

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

**TECNOLOGÍA DE LA PRODUCCIÓN VEGETAL, Y
CONSERVACIÓN DEL SUELO Y TECNOLOGÍA DEL RIEGO**

TESIS DOCTORAL

EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN ESTACIONARIOS CON VIENTO

INGENIERÍA AGRARIA, ALIMENTARIA, FORESTAL Y DEL
DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE. PLAN 2011

DOCTORANDO: D. Benito Salvatierra Bellido
Ingeniero Agrónomo

DIRECTORES DE TESIS:

D. Luis Pérez Urrestarazu
D. Jesús Montero Martínez

Sevilla, noviembre de 2019

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional. De los que me rodean y sobre todo por quien no está ahora para conocerlo.

Todo el agua que habrá jamás, la tenemos ahora mismo.

National Geographic.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado y ayudado durante este período, desde mis familiares a mis compañeros, y especialmente:

a Luis Pérez y Jesús Montero indudablemente, por no sólo su papel de tutor y director, sino por su apoyo moral a la hora de ser compaginado con mi vida laboral, y gracias a ellos he podido llegar hasta aquí.

a todos los compañeros que han colaborado en la tarea más ingrata, pero más importante, como es la realización de los ensayos experimentales.

a Francisco Estudillo y Juan Anselmo Andrades por su colaboración como alumnos en prácticas y contratado posteriormente.

a Luciano Mateos, por haber confiado en la temática elegida desde un primer momento,

a Rodrigo Morillo, José Luís Bermejo y a mi hermano José Miguel, todos pertenecientes a la Asociación de Investigación para la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (AIMCRA), por la íntima colaboración experimental en campo.

a los agricultores en cuyas parcelas se han hecho parte de los trabajos de esta tesis.

A las instituciones que han prestado recursos materiales, humanos y de conocimiento, como:

el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía por habilitar los medios a través del programa 'Sistema de Asesoramiento al Regante'.

la Universidad de Sevilla y la Universidad de Castilla-La Mancha.

AIMCRA, ya que sin ella no hubiera habido recursos materiales y técnicos para la fase investigación aplicada.

la Comunidad de Regantes del Sector B-XII de Lebrija, por la disposición en cualquier asistencia sobre las parcelas de ensayo..

las empresas fabricantes y suministradoras de aspersores como: Unirain, Regaber, Vyrsa y Naandanjain, las cuales han estado interesadas en todo momento por el progreso de las investigaciones y a su vez han aportado su colaboración para el desarrollo de las pruebas.

el Instituto de Agricultura Sostenible del Consejo Superior de Investigaciones Científicas por su apoyo asistencia en planteamiento de las líneas de investigación.

RESUMEN

EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN ESTACIONARIOS CON VIENTO

En la agricultura de regadío, el parámetro que califica mejor la calidad del riego es la uniformidad del riego. El riego por aspersión presenta una cierta dificultad para calcular la uniformidad de riego en función del diseño, debido a las variables que intervienen en su funcionamiento. Por tanto, estos sistemas de riego requieren de una gran atención en cuanto a la innovación sobre su análisis del riego. Este trabajo se ha iniciado identificando esta necesidad y ha perseguido desarrollar una metodología de análisis de la uniformidad del riego por aspersión para situaciones reales que se den en campo y a través de una base experimental. Con este objetivo, se ha partido de las metodologías existentes y de la tecnología disponible, para obtener una herramienta experimental que cubra las necesidades de conocimiento de la calidad de riego de los sistemas de riego por aspersión estacionarios.

Con estas bases, se comenzó, en una primera fase, el diseño y montaje de un banco de pruebas de aspersores que de manera ágil simulara las condiciones reales de riego al aire libre, para así tener una herramienta de análisis capaz de ofrecer valores finales de la calidad de riego en todas las situaciones de riego existentes. Esta tarea ha sido la que ha ocupado la gran parte del desarrollo experimental de este trabajo y ha culminado con el prototipo de un banco automático de ensayos de aspersores con viento. Junto a ello se desarrolló las herramientas correspondientes de análisis de los datos que se obtienen y la puesta a punto final y las necesidades de mantenimiento para el correcto funcionamiento del prototipo.

Una vez dispuesto el sistema se continuó con la segunda fase, la adquisición de información con múltiples ensayos de aspersores y cubriendo la demanda de los modelos de aspersores más representativos en el sector. Gracias a la aplicación particular de las metodologías y las herramientas desarrolladas para el tratamiento de datos (superposición de diseños, simulación de múltiples direcciones de viento, y de puesta a punto y calibración del propio banco automático de ensayos), se ha conseguido que el banco automático de ensayo de aspersores sea una herramienta operativa para cualquier iniciativa de mejora en la optimización del agua en riego por aspersión. Los resultados obtenidos sobre el desarrollo del banco automático de aspersores con viento fueron de 29.160 valores de uniformidad de aspersores de uso más frecuente en la agricultura de cultivos herbáceos. Con estos resultados se generó una base de datos con gran capacidad para obtener información y facilidad de ser procesada con los resultados obtenidos directamente de los ensayos. A su vez, estos ensayos permitirán, para situaciones no ensayadas, utilizar una metodología de interpolación de datos experimentales que cubra todas las casuísticas de riego de los aspersores ensayados.

En una tercera fase se cuantificó la influencia de las variables que afectan al riego por aspersión en función al tipo de aspersor utilizando el modelo estadístico de regresión

lineal múltiple. Al poder ser aplicada a cualquier grupo de aspersores o de situaciones, esta metodología permitirá tomar decisiones estratégicas en relación con diseños, presiones de trabajo, localizaciones óptimas, regímenes de viento, etc.

En el estudio abordado se analizaron de manera independiente los siguientes grupos de aspersores: de impacto convencionales con boquillas hexagonales, de impacto con boquillas de bayoneta y rotativos. Para ello, se estudiaron los comportamientos de distintos grupos en relación con todas las variables más relevantes: presencia de boquilla secundaria, velocidad y dirección del viento, presión, distancia entre aspersores y ramales de riego y disposición del marco de riego.

En una fase final, y habiendo caracterizado el funcionamiento de gran número de aspersores y detectada la demanda del sector de riego por el ahorro energético, se completó el trabajo con una línea específica e innovadora, en la cual se usó el banco automático de ensayo de aspersores para estudiar el riego por aspersión en condiciones de baja presión. El objetivo perseguido en este desarrollo fue la selección de aquellos aspersores y circunstancias en las que se obtienen presiones más bajas que las convencionales, obteniéndose buenos valores de uniformidad de riego. El estudio, no sólo se limitó a un análisis de la base de datos de los resultados generados con el banco automático de ensayos, sino que además se hicieron ensayos en campo con evaluaciones múltiples y simultáneas de los aspersores seleccionados para la baja presión (250 y 200 kPa). Finalmente, se estudió el comportamiento de los aspersores seleccionados en toda una campaña de riego con presiones de 200 kPa frente a aspersores en régimen de presión de 300 kPa aproximadamente. La conclusión de esta fase fue la viabilidad del riego a baja presión con aquellos aspersores obtenidos de la base de datos de ensayos del banco automático de ensayos de aspersores con viento.

SUMMARY

EVALUATION OF WATER DISTRIBUTION IN IRRIGATION STATIONARY SPRINKLER IRRIGATION SYSTEMS

In irrigated agriculture, the parameter that best qualifies the quality of irrigation is the uniformity of irrigation. Sprinkler irrigation has a certain difficulty to calculate irrigation uniformity depending on the design, due to the variables involved in its operation. Therefore, these irrigation systems have great attention in terms of innovation in their analysis of irrigation. This work has begun by identifying this need and has pursued a methodology for analyzing the uniformity of sprinkler irrigation for real situations that occur in the field and through an experimental base. With this objective, it has been based on the existing methodologies and the available technology, to obtain an experimental tool that covers the knowledge needs of the irrigation quality of the stationary sprinkler irrigation systems.

With these bases, the design and assembly of a sprinkler test bench that agilely simulates real outdoor irrigation conditions began in a first phase, in order to have an analysis tool capable of offering final values of irrigation quality in all affected irrigation situations. This task has been the one that has occupied most of the experimental development of this work and has culminated with the prototype of an automatic sprinkler test bench with wind. Along with this, the corresponding tools for analyzing the required data and the final set-up and maintenance needs for the correct functioning of the prototype are needed.

Once the system is arranged, the second phase is required, the acquisition of information with multiple sprinkler tests and covering the demand of the most representative sprinkler models in the sector. Thanks to the particular application of the methodologies and tools developed for data processing (design overlays, simulation of multiple wind directions, and commissioning and calibration of the automatic test bench), it has been achieved that the automatic sprinkler test bench is an operational tool for any improvement initiative in the optimization of water in sprinkler irrigation. The results obtained on the development of the automatic wind sprinkler bank were 29,160 values of uniformity of sprinklers most frequently used in arable crops. With these results, a database with great capacity to obtain information and ease of processing with the results directly from the trials was generated. In turn, these test methods, for situations not tested, use an experimental data interpolation methodology that covers all the irrigation cases of the sprinklers tested.

In a third phase, the influence of the variables that affect sprinkler irrigation is quantified according to the type of sprinkler using the multiple linear regression statistical model. Being able to be applied to any group of sprinklers or situations, this methodology can make strategic decisions in relation to designs, work pressures, optimal locations, wind regimes, etc.

In the study addressed, the following groups of sprinklers were analyzed independently: specific impact with hexagonal nozzles, impact with bayonet and rotary nozzles. For this, the behaviors of different groups were studied in relation to all the most relevant variables: presence of secondary nozzle, wind speed and direction, pressure, distance between sprinklers and irrigation branches and arrangement of the irrigation frame.

In a final phase, having specified the operation of the large number of sprinklers and detected the demand of the irrigation sector for energy savings, the work was completed with a specific and innovative line, in which the automatic sprinkler test bench was used to study sprinkler irrigation in low pressure conditions. The objective pursued in this development was the selection of those sprinklers and circumstances in the lower pressures at the frequencies, we obtained good values of irrigation uniformity. The study will not only be limited to an analysis of the database of the results generated with the automatic test bench, but also field tests will be carried out with multiple and simultaneous evaluations of the selected sprinklers for low pressure (250 and 200 kPa). Finally, the behavior of the selected sprinklers in an entire irrigation campaign with pressures of 200 kPa compared to sprinklers under a pressure regime of approximately 300 kPa was studied. The conclusion of this phase was the feasibility of low pressure irrigation with those sprinklers that may have the test database of the automatic sprinkler test bench with wind.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS

- Salvatierra Bellido, B. 2014. Banco automático de ensayo de aspersores con viento. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid. Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD)
- Salvatierra Bellido, B., Andrades González, J.A. 2015. Mejoras en el riego por aspersión. Revista de la Asociación de Investigación de la Remolacha Azucarera (AIMCRA), número 122, septiembre.
- Salvatierra Bellido, B., Andrades González, J.A., Gómez Durán, E., Viqueira Pina, S. 2015. Resultados de ensayos del banco automático de aspersores. XXXIII Congreso Nacional de Riegos. Valencia. AERYD.
- Salvatierra Bellido, B., Morillo Velarde, R., Pérez Urrestarazu, L., Andrades Gonzalez, J.A., Bermejo Corrales, J.L. 2016. Ahorro energético en riego por aspersión. Pruebas de nuevos aspersores en banco automático con viento. XXXIV Congreso Nacional de Riegos, Sevilla. AERYD.
- Morillo Velarde, R., Andrades Gonzalez, J.A., Salvatierra Bellido, B. 2016. Uniformity of irrigation in new sprinkler a low pressure. 75TH IIRB Congress IIRB (International Institute For Beet Research).
- Salvatierra-Bellido, B., Montero-Martínez, J., Pérez-Urrestarazu, L. 2018. Development of an automatic test bench to assess sprinkler irrigation uniformity in different wind conditions. Computers and Electronics in Agriculture 151, 31-40. doi: 10.1016/j.compag.2018.05.036

ÍNDICE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	20
1.1. ANTECEDENTES	22
1.1.1. La distribución de agua por los sistemas de riego por aspersión	23
1.1.1.1. La Uniformidad de Distribución de agua en riego	23
1.1.1.2. Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión.....	25
1.1.2. Factores que influyen sobre la Uniformidad en el riego por aspersión estacionario.....	27
1.2. MÉTODOS PARA CARACTERIZAR LA UNIFORMIDAD DE RIEGO EN ASPERSIÓN ESTACIONARIA. LOS BANCOS DE ENSAYOS.....	28
1.3. CALIDAD DEL RIEGO POR ASPERSIÓN EN ANDALUCÍA.....	30
1.4. EL ASESORAMIENTO EN RIEGO COMO FIN ÚLTIMO PARA MEJORAR EL RIEGO POR ASPERSIÓN	31
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DE LA PRESENTE TESIS DOCTORAL.....	32
2. OBJETIVOS.....	35
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1. MATERIALES.....	38
3.1.1. Diseño y construcción del banco de aspersores.....	38
3.1.1.1. Subsistema hidráulico y de presurización.....	41
3.1.1.2. Colectores.....	42
3.1.1.3. Pluviómetros automáticos	43
3.1.1.4. Anemoveleta.....	44
3.1.1.5. Subsistema de gestión de datos	44
3.1.1.6. Cableado.....	45
3.1.1.7. Torre de adquisición de datos.....	46
3.1.2. Software.....	46
3.1.2.1. Gestión de datos DL	46
3.1.2.2. Procesamiento de datos	46
3.1.2.3. Solapamiento de los resultados en diferentes marcos.....	47
3.1.2.4. Clasificación y análisis de los resultados.....	47
3.1.3. Explotación del banco.....	48
3.1.3. Ensayos alternativos	48
3.2 MÉTODOS	50
3.2.1. Diseño y montaje del banco.....	50
3.2.1.1. Subsistema hidráulico y de presurización.....	51
3.2.1.2. Subsistema de adquisición de datos.....	51
3.2.2. Clasificación de las variables.....	53
3.2.1.2. <i>Uniformidad del riego</i>	53
3.2.3.4. <i>Aspersores</i>	54
3.2.3.5. <i>Boquillas y accesorios</i>	55
3.2.4.1. <i>Tipos de viento</i>	58
3.2.4.1. <i>Dirección del viento</i>	59
3.2.3.2 <i>Tipos de marco</i>	60
3.2.3. Operaciones de uso del banco.....	60
3.2.3.1. <i>Puesta a punto</i>	61
3.2.3.2. <i>Realización de ensayos</i>	62

3.2.3.3. <i>Mantenimiento</i>	63
3.2.4. Obtención de los datos y procesamiento de la información obtenida.....	64
3.2.4.1. Obtención de los datos.....	64
3.2.4.2. Interpretación de los datos de viento.....	67
3.2.4.3. Interpretación de los datos pluviométricos.....	69
3.2.4.4. Solapamiento de aspersores en condiciones de riego.....	70
3.2.5. Ensayos.....	78
3.2.5.1. Resultados de los ensayos en el banco.....	80
3.2.5.2. Análisis y estudio de conjunto de resultados.....	81
3.2.5.3. Metodología de análisis de los resultados orientados al riego en baja presión.....	82
3.2.6. Evaluaciones complementarias.....	82
3.2.6.1. Evaluaciones múltiples simultáneas en campo.....	83
3.2.6.2. Evaluaciones sobre una campaña de riego en el cultivo de remolacha azucarera.....	87
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	92
4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN EL BANCO AUTOMÁTICO.....	92
4.1.1. Resultados de los ensayos en el banco automatizado.....	96
4.1.2. Ejemplo de estudio de la influencia de varias variables sobre la uniformidad de riego para diferentes tipos de aspersores.....	97
4.1.3. Análisis de los resultados orientados al riego en baja presión.....	100
4.2. RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES COMPLEMENTARIAS.....	108
4.2.1. Resultados de evaluaciones múltiples simultáneas en campo.....	108
4.2.2. Resultados de evaluaciones sobre una campaña de riego en el cultivo de remolacha azucarera.....	117
5. CONCLUSIONES.....	126
5.1. FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE ENSAYO AUTOMÁTICO DE ASPERSORES CON VIENTO.....	126
5.2. RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE ASPERSORES.....	126
5.3. ESTUDIO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN CON BAJA PRESIÓN.....	128
5.4. POSIBLES LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA.....	129
6. BIBLIOGRAFÍA.....	131
ANEXOS.....	136
ANEXO I: PROGRAMA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	138
ANEXO II: RESULTADOS DE ENSAYOS DE ASPERSORES.....	145
AII.1 Ensayos y resultados realizados en el banco de ensayo automático con viento.....	146
AII.2. Ensayos radiales sin viento.....	149

ÍNDICE DE TABLAS

Página

<i>Tabla 1. Valores de la E_D para varios CU y porcentajes de área adecuadamente regada [Keller y Bliesner (1990), adaptado de Hart y Reynolds (1965)].</i>	26
<i>Tabla 2. Clasificación de los valores de UD en función de la calidad del riego (Sistema de Asistencia al Regante, 2014).</i>	54
<i>Tabla 3. Matriz de datos de registrados por cada pluviómetro y obtenidos desde SAD.</i>	66
<i>Tabla 4. Matriz de datos de registrados por la anemoveleta y obtenidos desde SAD.</i>	66
<i>Tabla 5. Tabla de viabilidad del ensayo por dirección.</i>	68
<i>Tabla 6. Tabla de viabilidad del ensayo por velocidad.</i>	68
<i>Tabla 7. Resumen de las operaciones realizadas para obtener las medidas vectoriales.</i>	69
<i>Tabla 8. Identificación de los pluviómetros en el Modelo de rejilla de datos obtenida en la hoja de cálculo.</i>	70
<i>Tabla 9. Tabla de resultados del ensayo para cada velocidad y dirección de viento.</i>	77
<i>Tabla 10. Número de variables principales contempladas para los resultados perseguidos.</i>	79
<i>Tabla 11. Fecha y horario de las distintas evaluaciones por modelo de aspensor.</i>	84
<i>Tabla 12. Relación de casas comerciales colaboradoras y modelos de aspersores utilizados.</i>	87
<i>Tabla 13. Localización de los ensayos de riego. Siembra 2016.</i>	87
<i>Tabla 14. Datos de cultivo de las 4 parcelas.</i>	89
<i>Tabla 15. Variables involucradas en la prueba y los valores recogidos.</i>	94
<i>Tabla 16. Resultados de la consulta de la base de datos de ensayos del banco automático con viento para Uniformidades de Distribución mayores del 80% en marco de 12x15 y para presiones de 350, 250 y 200 kPa.</i>	106
<i>Tabla 17. Resultados de la consulta de la base de datos de ensayos del banco automático con viento para Uniformidades de Distribución mayores del 70% en marco de 12x15 y para presiones de 200 kPa.</i>	107
<i>Tabla 18. Relación de modelos de aspersores a ensayar en evaluación múltiple.</i>	109
<i>Tabla 19. Datos de viento medios horarios recogidos en la estación agroclimática situada en la zona regable de la prueba.</i>	110
<i>Tabla 20. Uniformidad de Distribución y Coeficiente de Uniformidad de Christiansen por modelo de aspensor.</i>	112
<i>Tabla 21. Resultados del patrón de distribución de lluvia y Uniformidad de Distribución de los aspersores evaluados en las tres evaluaciones múltiples.</i>	114
<i>Tabla 22. Registro de láminas de agua (mm) acumuladas en el balance hídrico por parcela.</i>	118
<i>Tabla 23. Datos de riegos de la parcela C-2059 y fecha de recolección.</i>	118
<i>Tabla 24. Datos de riegos de la parcela C-2064 y fecha de recolección.</i>	119
<i>Tabla 25. Datos de riegos de la parcela C-2065 y fecha de recolección.</i>	119
<i>Tabla 26. Datos de riegos de la parcela C-2071 y fecha de recolección.</i>	120
<i>Tabla 27. Evaluaciones realizadas por parcela.</i>	121
<i>Tabla 28. Resultados medios del CU (%) en las evaluaciones realizadas.</i>	122
<i>Tabla 29. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2059.</i>	123
<i>Tabla 30. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2064.</i>	123
<i>Tabla 31. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2065.</i>	124
<i>Tabla 32. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2071.</i>	124

Tabla 33. Relación de aspersores ensayados en el banco automático con viento..... 148
Tabla 34. Relación de aspersores ensayados en el banco de ensayo con metodología radial sin viento..... 149

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

<i>Figura 1. Diagrama de distribución del agua en sistemas por aspersión.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2. Resultados de las evaluaciones en función a la demanda (Salvatierra, 2010).</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3. Esquema de la tesis</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4. Diagrama de distribución de pluviómetros y el cableado con respecto a la ubicación del aspersor.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5. Fotografía y esquema del sistema banco de ensayo de aspersores con todos los subsistemas. (1) Circuito hidráulico: aspersor y toda la instalación necesaria, (2) Colectores de agua, (3) Pluviómetros automáticos, (4) Sensor de viento o anemoveleta, (5) Sistema de gestión de datos, (6) Cableado y (7) Torre para la adquisición de datos.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 6. Apoyo del aspersor para el banco de prueba y SAD en una caja sellada.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 7. Elementos de medición y control del banco. A la derecha el manómetro y a la izquierda uno de los caudalímetros.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 8. Colector unido a cada pluviómetro automático.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 9. Pluviómetro automático en la perspectiva de izquierda y derecha del indicador de lluvia planta sin la tapa superior.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10. Perspectiva de la anemoveleta.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11. Imagen del DL CR1000 a la izquierda y del ME SDM-IO16 a la derecha.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Programa de solapamiento de resultados del ensayo de un aspersor aislado</i>	<i>47</i>
<i>Figura 13. Imagen del banco de ensayo radial sin viento.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 14. Esquema hidráulico del banco de pruebas.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15. Esquema del sistema de adquisición de datos (SAD).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 16. Esquema de conexión entre los módulos de expansión y una pareja de pluviómetros.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 17. Representación gráfica de la uniformidad de distribución (Salvatierra, 2012)</i>	<i>53</i>
<i>Figura 18. Imagen de un aspersor convencional de impacto.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 19. Imagen de un aspersor rotativo.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 20. Tipos de boquillas 3PRN como principales y 3PSN como secundarias (Fuente: boletín técnico n° 0920 de la empresa Unirain, www.unirain.com)</i>	<i>56</i>
<i>Figura 21. Boquilla secundaria 3PSN 3/32” (Fuente: boletín técnico n° 0920 de la empresa Unirain, www.unirain.com).</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22. Imagen de boquillas de bayoneta (Fuentes: www.unirain.com y ww.vyrsa.com respectivamente).</i>	<i>57</i>
<i>Figura 23. Vaina prolongadora (izquierda) y dispersadora de chorro (derecha) (Fuente: www.unirain.com).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24. Estandarización de las direcciones del viento relativas con respecto a la rama de riego para los resultados finales de los datos.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 25. Gráfico de la evolución de los datos máximos, mínimos y medios de los coeficientes de calibración de cada uno de los pluviómetros.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 26. Imagen de la obstrucción de los pluviómetros.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 27. Captura de pantalla del ordenador del proceso de recolección de datos.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 28. Captura de pantalla del ordenador del proceso de conexión en tiempo real.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 29. Pantalla para la definición del ensayo.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 30. Posición del aspersor respecto a los pluviómetros.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 31. Pantalla para la introducción de la rejilla de datos.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 32. Pantalla del archivo “.grid” obtenido.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 33. Pantalla donde se muestra el icono de la función para modificar la orientación de los datos en la rejilla.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 34. Pantalla de la función para modificar la orientación de los datos.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 35. Pantalla de la función para modificar el tipo de marco.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 36. Pantalla de la función para modificar la distancia entre aspersores.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 37. Muestra la base de datos creado a través del formulario combinado de un ejemplo de ensayo de aspersor y una muestra de combinaciones.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 38. Detalle del control de la presión de ensayo a través de su fijación en el regulador (izquierda) y calibrada en el aspersor de manera simultánea (derecha).</i>	<i>84</i>
<i>Figura 39. Esquema de la ubicación de las diferentes subparcelas (rectángulos de color azul) de las múltiples evaluaciones y la ubicación de la zona de pluviómetros en cada subparcela. .</i>	<i>85</i>
<i>Figura 40. Imagen de detalle previa a la evaluación, sobre la colocación de los pluviómetros.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 41. Imagen de una de las evaluaciones durante una prueba.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 42. Croquis de diseño de parcela tipo.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 43. Ejemplo de la distribución de lluvia de un aspersor con viento (velocidad media de 3,05 m/s durante una prueba de 60 minutos.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 44. Resultados obtenidos de programa del ensayo y para un ejemplo con tres diseños de riego y tres direcciones del viento.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 45. Los resultados del ensayo comparando la disposición rectangular con la disposición triangular en el marco 12x15.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 46. Influencia de cada variable sobre la uniformidad de riego de en cada conjunto de aspersores probados con viento.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 47. Influencia de cada variable sobre la uniformidad de riego de aspersores de impacto convencionales con y sin viento.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 48. Porcentaje de aspersores ensayados que tienen UD inferiores a 75 y 80 %, para cada una de las presiones ensayadas y según los marcos más utilizados en riego por aspersión.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 49. Ensayos realizados de un modelo convencional de aspersor de impacto, señalando aquellos que tienen UD>75%, para cada una de las presiones ensayadas y según los marcos más utilizados en riego por aspersión.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 50. Porcentaje de ensayos realizados de un modelo convencional de aspersor de impacto que presentan una UD>80%, para cada una de las presiones ensayadas y según los marcos más utilizados en riego por aspersión.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 51. Gráficas de las líneas de tendencia polinómica de grado 5 resultante de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los tres valores de presiones ensayadas para el marco de riego de 12x12.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 52. Gráficas de las líneas de tendencia de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los tres valores de presiones ensayadas para el marco de riego de 12x15... </i>	<i>104</i>
<i>Figura 53. Gráficas de las líneas de tendencia de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los tres valores de presiones ensayadas para el marco de riego de 18x18... </i>	<i>104</i>
<i>Figura 54. Gráfica de valores medios y rangos de variación de las velocidades de viento durante cada una de las evaluaciones múltiples.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 55. Gráfica de U.D. de cada uno de los aspersores en las tres condiciones de presión y viento ensayados.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 56. Representación de los valores medios de Uniformidad de Distribución y la horquilla de variación de los doce modelos ensayados en cada prueba.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 57. Zonas de evaluaciones con los pluviómetros permanentes.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 58. Resultados de las UD en las zonas Agricultor y Baja Presión.</i>	<i>121</i>

Figura 59. Gráficas de las líneas de tendencia de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los dos valores de presiones ensayadas en campo en la campaña de riego. 122

Figura 60. Estructura de tablas de la base de datos generada con los resultados de los ensayos. 146

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

a: Área adecuadamente regada.

AIMCRA: Asociación de Investigación para la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera.

Cd: Coeficiente de déficit.

Cp: Porcentaje de percolación.

CU: Coeficiente de Uniformidad de Christiansen.

DL: Data Logger o registrador de datos.

D_n: Dosis neta de riego.

E_a: Eficiencia general de aplicación.

EDa: Eficiencia de distribución.

E_r: Eficiencia de riego.

Fa: Factor de disponibilidad.

H_b: Altura de agua bruta aplicada con el objetivo de cubrir con el riego la altura requerida.

H_{ba}: Altura de agua infiltrada en profundidad.

H_d: altura media de agua que representa el déficit en la zona infrarregada.

H_n: Altura media de agua que ha quedado almacenada en la zona radicular.

H_p: altura media de agua percolada por debajo de la zona radicular.

H_r: Altura de agua requerida para satisfacer las necesidades del cultivo a regar.

IFAPA: Instituto de Investigación y Formación Agraria de Andalucía.

ME: Módulo de Expansión.

P_e: Proporción de agua que llega al suelo frente al agua emitida por los emisores.

P_{ev}: Pérdidas de agua evitables antes de que el agua llegue al suelo.

P_f: Proporción del agua emitida por los emisores frente al agua que es bombeada en origen del sistema de riego.

Ra: Eficiencia de aplicación o rendimiento de aplicación.

SAD: Sistema de Adquisición de Datos.

SAR: Sistema de Asistencia al Regante.

SC: Coeficiente de programación de riego (Scheduling Coefficient).

UD: Uniformidad de Distribución.

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío se caracteriza por ser la más sostenible en términos socioeconómicos del conjunto de la producción agraria, ya que es la que más asegura la producción de alimentos y materias primas de origen vegetal en todas las escalas. Esto se cumple desde la propia parcela en el campo y trasciende hacia la explotación agrícola y al territorio donde se asienta. Por tanto, el regadío es el factor fundamental para un desarrollo rural y con diferencia en las latitudes de zonas climáticas semiáridas.

La superficie regada en España supone un 14% de la superficie agraria útil, pero si nos fijamos en la región andaluza, el riego cobra aún más importancia. Aun siendo la superficie de regadío en Andalucía un 24% del total de superficie agraria útil, la producción final agraria es del 63% del total, e igualmente tiene una gran influencia sobre el empleo generado (CAP, 2011).

Actualmente, y dada la tendencia de calentamiento global es necesario tener en cuenta conceptos medioambientales a largo plazo para corresponder a la sostenibilidad del planeta. En este sentido el regadío está obligado a subsistir siempre que se optimice la eficiencia en el uso del agua y en el uso de la energía. En estas condiciones el regadío aporta un balance muy positivo en términos de balance de impactos medioambientales.

En el marco actual, una gestión sostenible de nuestros regadíos deberá basarse en unas prioridades similares a las planteadas en la Estrategia 2020, como:

- Gestión inteligente: desarrollo de una economía basada en el conocimiento y la innovación.
- Gestión sostenible: promoción de una economía que haga un uso más eficaz de los recursos, que sea más verde y más competitiva.
- Gestión integradora: fomento de una economía con alto nivel de empleo, con cohesión social y territorial.

Estas prioridades son especialmente importantes para el riego por aspersión, que se caracteriza principalmente por un sistema de tuberías donde el agua presurizada sale por emisores llamados aspersores en forma de chorro. Estos aspersores aplican el agua en la parcela en forma de lluvia con el agua pulverizada en gotas. Por tanto se requiere energía para bombear el agua en el origen de la instalación. Por este principio se rigen todas las modalidades de riego por aspersión, tanto aquellos que se desplazan mecánicamente, como los estacionarios.

Los sistemas de riego por aspersión estacionarios son los más vulnerables a las condiciones climáticas, fundamentalmente al viento, que afecta en gran medida a la homogeneidad del reparto del agua sobre el suelo (Ascough, et al., 2004). Esta característica es la que define principalmente la calidad del riego por aspersión y es denominada como uniformidad de riego. Por tal motivo, los sistemas de aspersión estacionarios son los que deben de ser estudiados con mayor intensidad. Estos sistemas se caracterizan por las siguientes ventajas:

- Se adaptan a las distintas dosis de riego necesarias.
- No necesitan nivelación de la parcela.

- Son fáciles de automatizar.
- Suelen permitir el tratamiento con fertilizantes, fitosanitarios y lucha anti-helada siempre con manejos adaptados a cada disciplina.

Por otro lado, la aspersión es el método principalmente elegido para muchas situaciones específicas de cultivos debido a su versatilidad, ya que se adapta a cualquier situación incluida en una rotación de sistemas de cultivos extensivos.

Sin embargo, tiene una serie de inconvenientes que deben ser superados o paliados con más actividades de investigación y experimentación; entre ellos están:

- Puede lavar algunos tratamientos ya realizados sobre el cultivo si no se cuida su programación de los riegos.
- La uniformidad del riego podrá ser baja sin información previa y muy influida por los regímenes de viento en el momento de los riegos.
- Tienen un alto coste de inversión inicial, de mantenimiento y sobre todo de funcionamiento en régimen de presiones convencionales debido a los requerimientos de energía.

Por tanto, a nivel general y más específicamente en los sistemas de riego de aspersión estacionarios, es donde las variables que intervienen sobre la uniformidad del riego son más difíciles de conocer en condiciones reales de operación.

En este sentido las principales variables que influyen en la uniformidad del riego son:

- Disposición de los aspersores.
- Presión del agua.
- Arquitectura y tamaño de la boquilla o boquillas de salida de agua de los aspersores.
- Velocidad del viento.
- Dirección del viento.

Por tanto, todas las acciones encaminadas a adquirir conocimientos sobre la influencia de estas variables en la uniformidad de riego de instalaciones en funcionamiento asegurarán la viabilidad del sistema de riego por aspersión y potenciarán todas ventajas mencionadas, reduciendo los inconvenientes señalados. En definitiva, la sostenibilidad del riego por aspersión ayudará a un mejor desarrollo rural en la agricultura de regadío.

1.1. ANTECEDENTES

La actividad del riego se remonta a los años 1650 a.C. en las civilizaciones de Asia y sobre las tierras desérticas situadas entre los ríos Tigris y Eúfrates. Entonces aprovechaban las crecidas de estos ríos para canalizar el agua y ponerla en las tierras de cultivo.

La aparición del sistema de riego por aspersión es relativamente reciente. Comienza en los años 30 del siglo XX con la aparición de los primeros aspersores. Es en los años 40 donde se encuentran artículos divulgativos de la descripción del sistema (Christiansen, 1942). Posteriormente se fueron mejorando los materiales y a finales de los 40, a partir de que la industria del aluminio empezara a emerger produciendo a gran escala, fue cuando se empezó a extender este sistema de riego.

Desde entonces y hasta la actualidad los sistemas de riego por aspersión han ido evolucionando constantemente, desde la aparición de las máquinas de riego en 1960 hasta el riego por aspersión con cobertura que permite una automatización total.

Con los procesos de modernización llevados a cabo en las áreas de regadío en los últimos años se ha incrementado el número de redes de distribución de agua presurizadas, que permiten el servicio de riego de agua a demanda. Este hecho ha dado lugar en primera instancia al cambio de los sistemas de riego por gravedad a aspersión o riego localizado. Estos dos métodos tienen ventajas tales como: mayor eficiencia de aplicación, control de la lámina de agua que proporciona y la posibilidad de automatizarlos completamente. Sin embargo, en el método de riego por aspersión hay varios elementos desfavorables en contra como son: el menor grado de igualdad de dosis recibido por los diferentes puntos de la parcela (uniformidad de riego), las mayores pérdidas por evaporación y arrastre durante el riego, y los requerimientos de energía necesarios para un correcto funcionamiento del aspersor.

No obstante, el riego por aspersión es una opción insustituible en muchas situaciones, como podría ser: riegos de nascencia, riegos de mantenimiento de estructuras de alomado, etc.

En los últimos años, los sistemas de riego de Andalucía están sufriendo cambios tanto de forma cuantitativa como de forma cualitativa. Según los datos del último inventario de regadío de Andalucía proporcionados por la Junta de Andalucía (CAP, 2008), la superficie regada registrada en el año 2008 ha aumentado un 23% respecto a su anterior registro en el año 1997. El 72% de las tierras regadas se encuentran en la cuenca del Guadalquivir, principalmente en las provincias de Sevilla y Jaén. Fuera de esta zona, las principales regiones donde se concentran las explotaciones con sistema de riego por aspersión se pueden considerar que pertenecen a las comarcas de cultivos tradicionales de Granada y Almería y en la provincia de Cádiz, lugar donde se encuentra el centro de investigación que aborda este proyecto.

Tradicionalmente, en el caso de las explotaciones con déficit en la uniformidad del riego, la solución consiste en aportar una dosis de riego en exceso y en función de la eficiencia de aplicación (Ea). Así, las zonas “infrarregadas” obtienen una dosis de agua adecuada y existiría un exceso de aplicación de agua en el resto de la superficie. Esta medida puede ser factible económicamente cuando el precio del agua no conforma un gasto importante en la finca. Con la subida de precios del agua, esto se convierte en algo

inviabile económicamente, además de los perjuicios agronómicos que conlleva. Por esto, la Ea es un aspecto muy importante en los sistemas de aspersión actuales, ya que es el que peores resultados de uniformidad demuestra en sus evaluaciones.

1.1.1. La distribución de agua por los sistemas de riego por aspersión

La práctica del riego es una tarea cultural que dado el uso de dos recursos muy apreciados como el agua y la energía requiere optimizar en todo momento la eficiencia de aplicación del agua. Esta eficiencia tiene en cuenta la diferencia entre el agua tomada por el cultivo frente a la total aplicada. En el camino quedan las pérdidas por evaporación, escorrentía y percolación profunda. Por tanto, para perseguir un sistema de riego eficiente es necesario conocer el comportamiento del mismo y las variables que influyen para llegar a poder hacer diseños que cumplan con alto grado de eficiencia.

Uno de los parámetros que influye en la eficiencia del riego por aspersión es la uniformidad del riego en la aplicación del agua. Ésta indica el grado de igualdad de dosis recibida por los diferentes puntos de la zona regada.

Ambos conceptos uniformidad y eficiencia han de ser estudiados para conocer la calidad del riego por aspersión.

1.1.1.1. La Uniformidad de Distribución de agua en riego

La uniformidad del riego es definida como la uniformidad de distribución de agua al regar. Uno de los coeficientes más importantes que analizan la uniformidad, y que además es aplicable a todos los sistemas de riego es la Uniformidad de Distribución (UD), que se define como:

$$UD_{25} = \frac{\text{Altura media recogida en el 25\% del area menor regada}}{\text{Altura media de agua recogida}} \quad \text{ec. 1.1}$$

Sin embargo es usual utilizar en riego por aspersión el valor de UD_{50} y que fue adoptado como Uniformidad de Christiansen (Christiansen, 1942).

Según diferentes estudios ((Keller y Bliesner, 1990; Valiente, 1995), se puede obtener el coeficiente de uniformidad de Christiansen a partir del UD a través de la fórmula experimental:

$$CU=0,63 UD+37 \quad \text{ec. 1.2}$$

En la figura 1 se esquematiza la representación de la distribución de recogida de agua a la hora de aplicar un riego (Tarjuelo, 2005). Esta distribución de agua se ajusta en la generalidad de los casos del riego por aspersión y localizado a una distribución normal (Valiente, 1995).

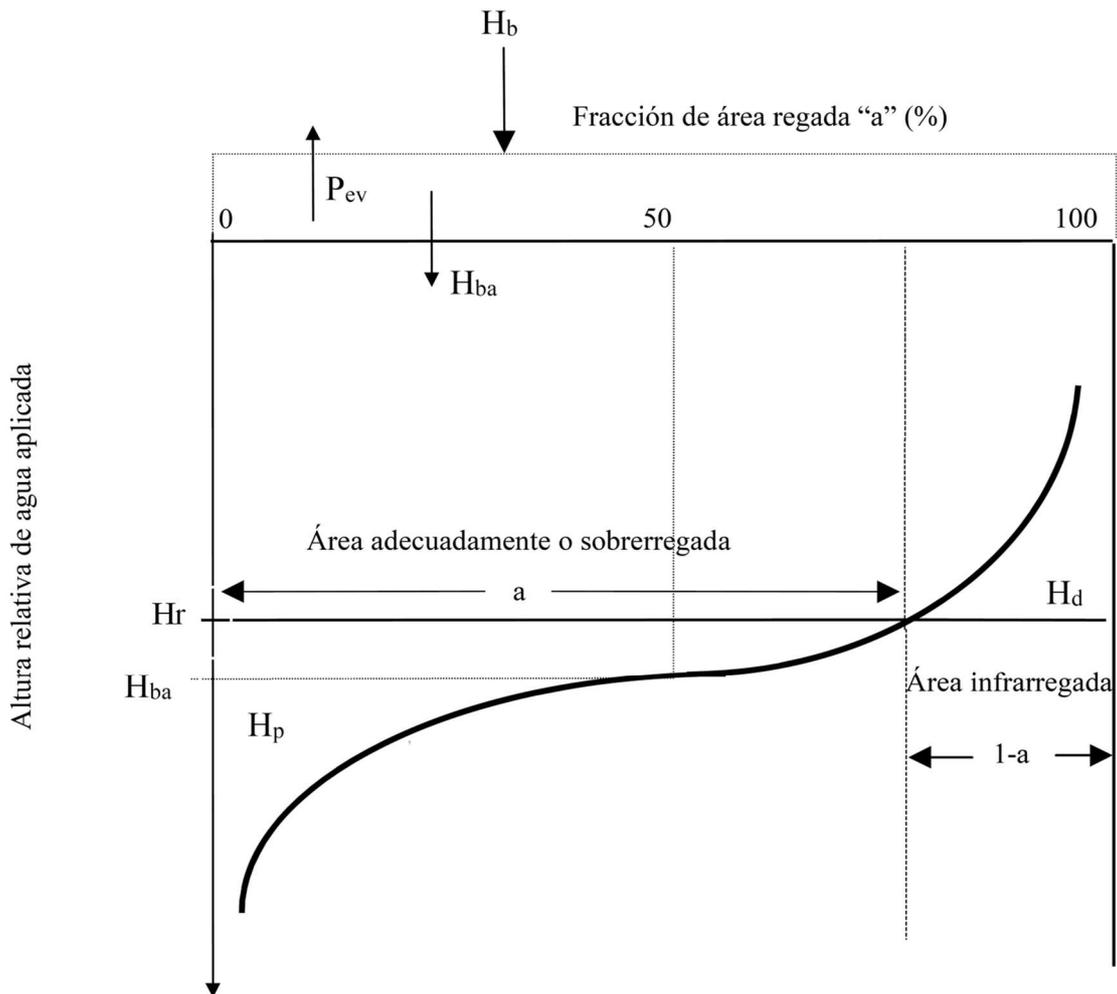


Figura 1. Diagrama de distribución del agua en sistemas por aspersión.

Donde:

H_r : Altura de agua requerida. Aquella calculada para satisfacer las necesidades del cultivo a regar en una superficie "a" con una dosis neta apropiada D_n .

H_b : Altura de agua bruta aplicada con el objetivo de cubrir con el riego la H_r .

P_{ev} : Pérdidas de agua evitables antes de que el agua llegue al suelo. En riego por aspersión la evaporación no es evitable, pero son representadas como tales en la siguiente gráfica.

H_{ba} : Altura de agua infiltrada en profundidad y debida a la falta de uniformidad del riego aplicada con el objetivo de cubrir con el riego la H_r .

H_n : Altura media de agua que ha quedado almacenada en la zona radicular (menor que H_r en el caso de que exista zona de déficit).

H_p : altura media de agua percolada por debajo de la zona radicular.

H_d : altura media de agua que representa el déficit en la zona infrarregada (1-a).

La calidad del riego para el porcentaje de área bien regada o sobrerregada (a) se define a través de una serie de parámetros (Tarjuelo, 2005):

- Eficiencia de aplicación o rendimiento de aplicación: $R_a = H_n/H_{ba}$.

- Eficiencia de distribución: $ED_a = H_r/H_{ba}$.
- Coeficiente de déficit: $C_d = H_d/H_r$.
- Factor de disponibilidad: $F_a = H_n/H_r$.
- Porcentaje de percolación: $C_p = H_p/H_b$.

1.1.1.2. Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión

El concepto de Eficiencia de riego (E_r) es definida como la fracción del agua bruta aplicada que es utilizada para cubrir las necesidades del cultivo y de lavado y viene definida como:

$$E_r = \frac{H_n}{H_b} \quad \text{ec. 1.3}$$

El valor de H_n es complicado de determinar y por tanto se utiliza el concepto de Eficiencia general de aplicación (E_a) y que atiende a la siguiente fórmula:

$$E_a = \frac{H_r}{H_b} \quad \text{ec. 1.4}$$

Los factores que difieren en riego por aspersión entre ambas láminas o dosis (ya que cualquier concepto de lámina podrá ser convertido en dosis con la variable tiempo de riego) son, según Keller y Bliesner (1990):

- Falta de uniformidad en la aplicación del sistema.
- Percolación profunda.
- La evaporación.
- El arrastre por el viento y las fugas en las tuberías.

Por tanto, y desde el punto de vista de diseño de un sistema de riego por aspersión se deberá tener en cuenta estos factores con la siguiente fórmula (Keller y Bliesner, 1990):

$$E_a = ED_a * P_e * P_f \quad \text{ec. 1.5}$$

Dónde:

- P_e : Proporción de agua que llega al suelo frente al agua emitida por los emisores.
- P_f : Proporción del agua emitida por los emisores frente al agua que es bombeada en origen del sistema de riego.
- ED_a : Es la eficiencia de distribución definida como la relación entre el agua requerida frente al agua infiltrada por la falta de uniformidad del riego.

Por tanto, Eficiencia de Distribución de agua (ED_a) para un cierto porcentaje de área “a” adecuadamente regada como:

$$ED_a = \frac{\text{Altura neta mínima recibida por la fracción "a" del área regada} \cdot 100}{\text{Altura media recibida por el área regada}} \quad \text{ec. 1.6}$$

Con esta fórmula se tendría en cuenta la falta de uniformidad y las pérdidas por percolación profunda y dispondrá de parámetros conjugables entre las medidas de Uniformidad (CU) con el concepto de área adecuadamente regada “a” y obtener una medida de la eficiencia de distribución (ED_a).

Considerando que los datos para obtener el CU siguen una función de distribución normal, existe una ecuación que relaciona la ED_a en función de “a” y CU (Allen, 1987):

$$ED_a = 100 + (606 - 24,9 a + 0,349 a^2 - 0,00186 a^3) \left(1 - \frac{CU}{100}\right) \quad \text{ec. 1.7}$$

La tabla 1 (Keller y Bliesner, 1990) representa la citada relación, dónde a partir de los valores de entrada de CU y el porcentaje del área adecuadamente regada, se obtiene la ED_a .

Tabla 1. Valores de la ED_a para varios CU y porcentajes de área adecuadamente regada [Keller y Bliesner (1990), adaptado de Hart y Reynolds (1965)].

CU (%)	% de área adecuadamente regada (a)									
	95	90	85	80	75	70	65	60	50	
94	88	90	92	94	95	96	97	98	100	
92	83	87	90	92	93	95	96	97	100	
90	79	84	87	89	92	93	95	97	100	
88	75	81	84	87	90	92	94	96	100	
86	71	77	82	85	88	91	93	96	100	
84	67	74	79	83	86	89	92	95	100	
82	63	71	77	81	85	88	91	94	100	
80	59	68	74	79	83	87	90	94	100	
78	55	65	71	77	81	86	89	93	100	
76	50	61	69	75	80	84	88	92	100	
74	46	58	66	73	78	83	87	92	100	
72	42	55	64	70	76	82	86	91	100	
70	38	52	61	68	75	80	85	90	100	
68	34	49	58	66	73	79	85	90	100	
66	30	45	56	64	71	78	84	89	100	

Un supuesto (Montero, 1999) sería el siguiente, si se dispone un sistema de riego por aspersión de 88 % de CU y para un área adecuadamente regada del 80%, la eficiencia de distribución será del 87%. Esto significaría que por cada mm de agua que recibe el cultivo, el 80% del área regada recibirá el 87% de la altura media aplicada o más, y el

20% del área regada recibirá menos del 87% de la altura media aplicada. Y por tanto, la altura media aplicada después de quitar las pérdidas por evaporación y arrastre, debe ser de $1 \text{ mm} / 0,87 = 1,15 \text{ mm}$.

En caso de un CU del 70%, se tendrá una $ED_{80} = 68\%$, y para conseguir una altura neta media de 1 mm o más en el 80% del área regada, se necesitará una altura media aplicada de 1,47 mm.

Para un valor de área adecuadamente regada del 80%, los valores de CU y ED_{80} son aproximadamente iguales. Según Tarjuelo (2005), para los cultivos de valor medio o alto suele proponerse que el área bien regada sea al menos del 90%, y para cultivos de menor valor pueda quedarse en el 80%.

1.1.2. Factores que influyen sobre la Uniformidad en el riego por aspersión estacionario

Un objetivo fundamental para una correcta aplicación de agua es obtener una alta uniformidad de riego. Se puede expresar a través de diferentes parámetros o coeficientes, tales como: la Uniformidad de Distribución (UD) (Merriam y Keller, 1978; Merriam et al., 1999) o el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU) (Christiansen, 1942). Para un programa de riego bien ejecutado y de acuerdo a los requerimientos de riego estimados del cultivo, una uniformidad por debajo de la aceptable ($UD < 75\%$) produce una pérdida de 20% en la cosecha (Mantovani et al., 1995; Jiusheng Li, 1998). Esto demuestra que, no sólo desde el punto de vista del ahorro de costes (energía y agua) sino de producción, no debería ser aceptable un UD bajo. Según Keller y Bliesner (1990), la mayoría de los sistemas de riego por aspersión requieren un valor mínimo de CU superior al 84% para cultivos de alto valor. Bralts et al. (1994) indicaron que un aumento del 5-12% en CU podría conducir a un rendimiento 3-17% más en grano de trigo. Los valores bajos de CU indican generalmente una combinación defectuosa del número y el tamaño de las boquillas, la presión de funcionamiento y el espaciamiento de los emisores (Tarjuelo et al., 1999b).

Muchos factores influyen en el rendimiento del riego por aspersión (Tarjuelo, 2005; Sánchez et al., 2011a). Sin embargo, el viento es una variable incontrolada y tiene una influencia decisiva en la eficiencia y uniformidad del riego por aspersión (Seginer et al., 1991; Tarjuelo et al., 1999b; Zapata et al., 2007; Sheikhesmaeili et al., 2016). Por lo tanto, es conveniente conocer la UD para cada escenario de riego y el posible régimen de viento. Esto permite determinar los momentos óptimos para el riego sin influencia de efectos indeseados debidos al viento (Sánchez et al., 2011b). Sin embargo, en muchos casos, no es posible regar en condiciones de viento desfavorables, y los sistemas de riego por aspersión están sujetos a la presencia de viento con diferentes regímenes que afectan las condiciones de operación. Este factor hace que sea muy difícil obtener información sobre la UD actual.

La velocidad y la dirección del viento son los principales parámetros que tienen mayor impacto en el modelo de distribución de agua (Tarjuelo et al., 1999b) y desempeñan un papel importante en las pérdidas por deriva y evaporación (Dechmi et al., 2003; Tarjuelo et al. 2000; Keller y Bliesner, 1990). Muchos autores indican que la influencia del viento depende en gran medida de los parámetros del diseño del sistema,

tales como la presión de trabajo, el espaciamiento, el tamaño de la boquilla o el tipo de aspersor (Keller y Bliesner, 1990; Burt et al. 1997).

1.2. MÉTODOS PARA CARACTERIZAR LA UNIFORMIDAD DE RIEGO EN ASPERSIÓN ESTACIONARIA. LOS BANCOS DE ENSAYOS.

Se pueden usar diferentes alternativas para determinar la uniformidad del riego por aspersión en sistemas estacionarios. Cada procedimiento se adapta a los requisitos de información, con un alcance de resultados más o menos limitado:

1. Modelo Radial (Vories y Von Bernuth, 1986). Es una evaluación de manera aislada y sin viento, del modelo de aspersor, con sus boquillas y a una determinada presión de funcionamiento. Básicamente es una evaluación con una fila de pluviómetros en la dirección del radio del círculo del área mojada del aspersor. Los resultados obtenidos sirven para deducir distribución de la pluviometría que tendría el aspersor en la totalidad del área mojada. Es utilizado principalmente para caracterizar el aspersor y las boquillas en condiciones ideales sin viento (Tarjuelo et al., 1999a), siendo una información exigible a los fabricantes de aspersores y ofreciendo un dato de partida para el diseño de riego (Stambouli et al., 2014).
2. Modelo matricial (ISO 15886-3:2012, 2012). Es también una evaluación de un aspersor aislado pero tiene la ventaja de conocer el modelo completo de distribución pluviométrica del aspersor en toda el área mojada. Es utilizado principalmente para caracterizar el aspersor y las boquillas en condiciones con viento. Consiste en disponer de una red de pluviómetros que abarquen la superficie mojada de un aspersor aislado para posteriormente determinar la uniformidad de riego en función al marco de funcionamiento. Este procedimiento tiene inconvenientes: la variabilidad de las condiciones climáticas durante el ensayo, la diferente evaporación en los pluviómetros periféricos respecto a los centrales y los altos requerimientos de mano requeridos para cada ensayo. Este procedimiento se usa principalmente en centros de investigación que se dediquen al estudio de aspersores y boquillas.
3. Evaluación del sistema (Merriam y Keller, 1978; Merriam et al., 1980). Consiste en la evaluación real en campo de una instalación de riego existente y sus condiciones. Se realiza en una zona muestral de la instalación y mediante la disposición de una red de vasos pluviométricos. Es ideal para determinar la calidad del riego en las condiciones (viento, presión, etc.) en las que se hace la evaluación.
4. Utilización de modelos de simulación. En las últimas décadas, muchos modelos de simulación de evaluación del riego han sido desarrollados con diferentes teorías. Todos, con el fin de evitar la laboriosidad de las pruebas experimentales. Existen modelos balísticos que se basan en la simulación de la trayectoria de las gotas de agua en el aire cuando salen del aspersor y son distorsionadas por la acción del viento (Fukui et al., 1980; Vories et al., 1987; Seginer et al., 1991; Carrion et al., 2001; Montero et al., 2001; Playán et al., 2006; Li et al., 2013; Yongchong et al., 2015). Los modelos semi-empíricos simulan la forma de distribución de agua distorsionado por el viento, a partir de los resultados en condiciones sin viento (Richards y Weatherhead, 1993;

Han et al., 1994; Molle y Le Gat, 2000). Otros modelos utilizan técnicas matemáticas de redes neuronales artificiales, simulando el efecto del viento sobre el patrón de distribución de agua de los emisores (Lazarovitch et al., 2009; Hinnel et al., 2010; Sayyadi et al., 2012). En cada caso, los modelos de simulación deben ser calibrados y validados por medio de pruebas experimentales.

Dependiendo del método elegido, la cantidad y calidad de la información variará. En el primer caso, se puede obtener una gran base de datos que caracteriza a todos los aspersores, pero sólo para las condiciones de operación sin viento. La segunda puede ser considerada como la más precisa y sus resultados pueden ser fácilmente extrapolados. Sin embargo, esta evaluación es costosa tanto en tiempo como en recursos, y requiere una infraestructura específica. En el tercer caso, se pueden realizar muchas evaluaciones de campo, pero en condiciones tan específicas que difícilmente se adaptarán a otras circunstancias.

Ya en los trabajos de Tarjuelo et al. (1999, a y b), Carrión et al. (2001) y Montero et al. (2001) se realizaron ensayos según el modelo radial y el matricial. Para el primer caso se ensayaron tres modelos de aspersores con tres repeticiones donde se obtienen las características básicas de funcionamiento como los coeficientes de uniformidad (CU y UD) para diferentes marcos de riego todos ellos sin viento, para dos alturas de aspersor desde el suelo (0,6 m y 2 m) y para tres presiones distintas 300, 350 y 400 kPa

Sin embargo, con el modelo matricial se ensayaron diecisiete combinaciones de aspersor-boquillas sobre un aspersor aislado a una altura determinada y a una presión de 350 kPa y todo bajo diferentes condiciones de viento. El total fueron 119 ensayos. Para cada combinación realizaron al menos 4 ensayos con diferentes velocidades de viento, habiendo variado en un rango entre 0,55 y 8,07 m/s.

Todos ellos fueron realizados de manera manual con la necesidad de recursos humanos que conlleva en ambos modelos de ensayo y la limitación de los datos puntuales de viento recogidos. En cualquier caso se obtuvo mucha información en relación a la influencia del conjunto de variables que intervienen en el riego por aspersión y su interrelación, pero sólo para el conjunto de ensayos analizados.

Tanto los modelos de distribución de agua radiales o de matriz pueden ser automatizados para evitar costes laborales, con la consiguiente ventaja de reducir el error debido a la evaporación de los colectores durante la prueba. En el caso del banco de pruebas de matriz, Hermsmeier (1972) automatizó la recopilación de datos tomando fotografías para ver el nivel de agua en los recipientes de captación. Para el ensayo radial, Fischer y Wallender (1986) automatizaron la recolección de agua a través de válvulas automáticas, utilizando un transductor de presión para detectar el nivel del agua. Este fue el precedente de los actuales bancos radiales automáticos con células de carga como el que se utiliza en el Centro Nacional de Tecnología de Regadíos de España. Otros equipos automatizados utilizados para obtener el modelo radial de distribución de agua en condiciones sin viento es descrito por Seginer et al. (1992), Tarjuelo et al. (1999a) y Zanon et al. (2000). Hodges et al. (1990) utilizaron el sistema de matriz en una instalación de prueba automatizada programada para operar desatendida, donde la velocidad del viento superó los 2,2 m/s.

Los bancos de ensayo automáticos implican un complejo, pero eficaz sistema de adquisición y procesamiento de datos que permite un análisis más profundo. Esta herramienta no sólo puede generar una gran cantidad de datos experimentales, sino que

también podrá emplearse para calibrar y validar los modelos de simulación de riego por aspersión.

1.3. CALIDAD DEL RIEGO POR ASPERSIÓN EN ANDALUCÍA

Desde el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA) se lleva una larga trayectoria en asesoramiento en el manejo de los sistemas de riego. En concreto la unidad operativa del Sistema de Asistencia al Regante (SAR) creó una metodología de evaluación de los distintos sistemas de riego en campo (CAP, 2001), basada en la propuesta por Merriam y Keller (1978) y posteriormente publicada por el SAR (2014a, 2014b). Su uso posterior por esta misma Unidad y en concreto sobre el riego por aspersión dieron como resultado datos de 95 evaluaciones de instalaciones de riego por aspersión en campo, la mayoría de cobertura total (Salvatierra, 2010).

Del conjunto de resultados obtenidos se determinó que el 71% de las instalaciones tenía una uniformidad inaceptable, sólo el 28% de las instalaciones tuvieron una uniformidad adecuada y el 10% tuvieron una uniformidad muy buena.

A la vista de los resultados obtenidos se clasificaron las causas del problema de la mala uniformidad en:

- Inadecuado manejo de la instalación (causa en el 18% de los casos con baja eficiencia).
- Baja calidad de los materiales (9% de los casos).
- Mal diseño del sistema (73% de los casos).

De todos los resultados cabe destacar los mostrados en la figura 2, donde se refleja la UD en función de si la evaluación es demandada por el agricultor o es ofrecida por el propio SAR. En condiciones normales, es difícil conseguir demandas por el propio agricultor, pero muchos de los datos que se exponen proceden de un Servicio de Asesoramiento al Regante ya implantado, como es el caso de la CR del Genil-Cabra, dónde ya se había implantado el servicio.

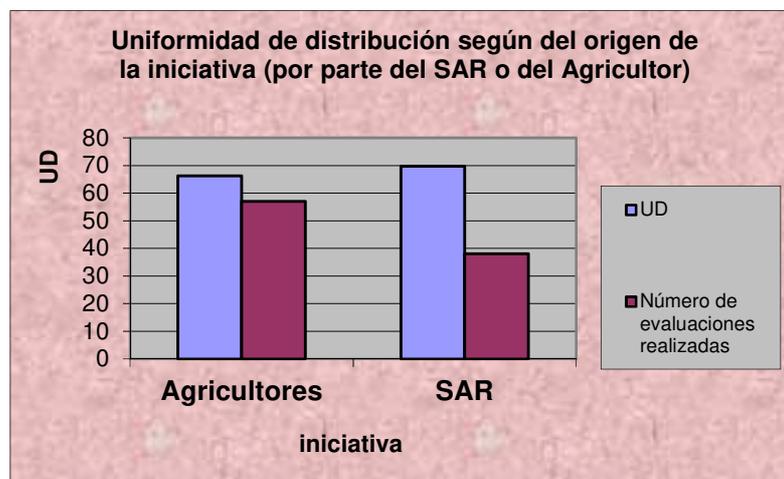


Figura 2. Resultados de las evaluaciones en función a la demanda (Salvatierra, 2010).

Cuando la demanda proviene de los propios agricultores, es porque previamente ellos han sido capaces de identificar el problema, para ello previamente recibieron información y formación sobre uniformidad del riego. En tales casos los valores de UD son más bajos, ya que los síntomas han sido manifiestos en el propio cultivo.

Estos datos sirven para identificar un doble problema. Por un lado que los agricultores no conocen la importancia de tener un sistema con buena uniformidad y por otro que existe una gran cantidad de instalaciones que no riegan de manera aceptable. A partir de aquí y sólo con este diagnóstico se justifica seguir trabajando en la optimización del uso del agua en riego por aspersión.

Posteriormente la Asociación de Investigación para el Cultivo de la Remolacha Azucarera (AIMCRA), diseñó una campaña de Asesoramiento al Regante dónde se evaluaron la mayoría de las instalaciones en Andalucía regadas con este cultivo. Los resultados se publicaron en la revista de AIMCRA (Salvatierra, 2012). Fueron un total de 47 evaluaciones junto con evaluaciones posteriores simultáneas con el material evaluado a agricultores como herramienta complementaria al análisis de las instalaciones. Del diagnóstico de las instalaciones en campo se obtuvieron resultados similares a los recogidos por el SAR.

1.4. EL ASESORAMIENTO EN RIEGO COMO FIN ÚLTIMO PARA MEJORAR EL RIEGO POR ASPERSIÓN

Actualmente, el mercado de aspersores ofrece una gran variedad de modelos, de tipos de boquillas y de elementos de control del chorro del agua. Si a esto se une la multitud de variables que entran en juego a la hora de regar (presión del agua, marco de los aspersores, disposición de los mismos, velocidad y dirección del viento, etc.), decidir la mejor opción para cada situación es una tarea compleja. De partida, obtener el valor de uniformidad de riego de una finca es una tarea costosa y poco fructífera, pues refleja unas condiciones muy concretas.

La decisión de elegir la mejor disposición de aspersores y las condiciones de manejo son competencia de un técnico asesor en riego. Actualmente, las fuentes de información existentes son escasas y basadas en tendencias de aspersores y no de todos los existentes en el mercado. Determinadas iniciativas de asesoramientos locales han conseguido hacer campañas de evaluaciones de instalaciones ya existentes, como hemos visto anteriormente, pero no dejan de ser actuaciones de diagnóstico. Por tanto, es una demanda del sector disponer de información precisa de todas las configuraciones de riego y multitud de condiciones sobre la uniformidad de riego. Con esta información conseguida y con un asesoramiento en la programación del riego, el sistema de riego por aspersión podría estar a la altura de un riego localizado en lo referente a calidad del riego.

De las campañas de evaluación realizadas se han modificado diseños o condiciones de trabajo, siempre que en la misma comarca de evaluación se ha conseguido buenos resultados en otras evaluaciones de sistemas de la misma comarca. Pero las posibilidades se ven limitadas a la comparativa limitada de situaciones muy concretas.

Además, el riego por aspersión ha de enfrentarse a nuevos retos. El más inmediato es el ahorro energético. El coste energético del riego a presión en las explotaciones agrícolas representa un alto porcentaje de los costes de producción, y por tanto, es uno de los factores prioritarios que se debe reducir para mejorar la competitividad y rentabilidad de la actividad agrícola de regadío.

AIMCRA en este caso ha puesto sobre la mesa la posibilidad de bajar las presiones requeridas de los aspersores y plantea el reto de determinar la calidad del riego a través una transición hacia un riego de baja presión.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DE LA PRESENTE TESIS DOCTORAL

Una vez definidos los problemas del riego por aspersión estacionario, es evidente la necesidad de continuar trabajando para obtener mayor información sobre la uniformidad de riego de los aspersores y la capacidad de disponer de esta información para cualquier escenario.

Un mayor conocimiento de la uniformidad de riego en las instalaciones de riego por aspersión se traducirá en un aumento de la rentabilidad de cualquier modo. Si se dispone de información completa, con un apoyo técnico y una formación mínima por parte del agricultor para identificar los problemas, se conseguiría:

- Conocer y controlar los factores que intervienen en la eficiencia del riego para mejorarla en las instalaciones que ya están funcionando.
- Realizar diseños de riego en nuevas instalaciones.

Estudios de gran rigor (Tarjuelo, 2005) sobre la velocidad del viento arrojan conclusiones genéricas pero no determinantes para casos concretos. En general es unánime la afirmación de que la uniformidad se ve mermada frente a un aumento de la velocidad del viento a causa de la diferencia de agua recolectada entre sotavento y barlovento del aspersor y el aumento de rotura del chorro de agua que se produce. Igualmente la dirección influye directamente en el reparto de agua. Además, en cuanto a la duración del riego, la distorsión producida en zonas sin un viento claramente dominante se compensa con los sucesivos riegos, pero en el caso de las zonas en las que la época de riego coincide con períodos de un tipo de viento dominante, la distorsión en el reparto del agua es mucho más significativa. El estudio del efecto de la dirección de ataque del viento, en muchos casos, presenta discrepancias en múltiples aspectos. Por ejemplo, la recomendación clásica de posicionamiento de los marcos rectangulares de forma que coincida el viento dominante con la dirección de mayor espaciamiento es a veces engañosa y, en ocasiones, es al contrario (Tarjuelo 2005). Por este motivo, y a causa también de la difusa y escasa información que hay al respecto, se consideró como un tema importante para abordar en un estudio de investigación el análisis de la uniformidad que tuviera en cuenta para cada caso la dirección de ataque del viento respecto las líneas de aspersión.

Realizar un enfoque más concreto sobre la uniformidad del riego por aspersión y para casos concretos es lo que justifica el desarrollo de un banco de pruebas de aspersores con viento. La puesta en servicio de un dispositivo que analice la distribución del agua de

riego en el sistema de aspersión con respecto al viento no es posible sin una automatización. El desarrollo de un banco automático persigue obtener en continuo todas aquellas variables instantáneas de distribución del agua de riego y de características de viento (Salvatierra, 2014). Una vez obtenidas estas dos variables numéricas de: agua recogida en cada punto geográfico, velocidad y dirección del viento, permitirá un análisis exhaustivo del riego en relación con la variable viento. Los resultados obtenidos del análisis de un aspersor aislado frente al viento, permitirá posteriormente reproducir a través de un modelo matemático el comportamiento en distintos marcos y orientaciones del viento para el análisis de la distribución del agua en condiciones reales de funcionamiento. Por tanto, el banco automático desarrollado, mejorará la optimización del uso del agua en multitud de aspectos en el riego por aspersión.

Esta situación de partida hará que, en el trabajo aquí desarrollado, se persiga la obtención de información del comportamiento del riego por aspersión y el uso de la metodología y tecnología más eficiente para ello.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El propósito final de esta tesis es generar una metodología y herramientas con la capacidad de estudiar y mejorar la uniformidad de distribución del agua en riego por aspersión, especialmente cuando existan condiciones indeseadas de viento.

Los objetivos específicos perseguidos son los siguientes:

- 1- Construcción de un prototipo de banco automático de ensayo de aspersores al aire libre.
- 2- Elaboración de una metodología de ensayo de aspersores en condiciones de monitorización del viento y toma de datos automatizada.
- 3- Comprobación del funcionamiento del banco y de la metodología.
- 4- Explotación del banco con ensayos de aspersores a demanda del sector y estudio de los datos.
- 5- Conformación de una base de datos de resultados que permitan tareas posteriores de explotación de los datos.
- 6- Comprobación en campo de los resultados obtenidos en el banco de ensayo.

Todos estos objetivos específicos, no sólo están interrelacionados entre sí, sino que además requieren de una línea de trabajo secuencial que persigue ir consolidando el paso previo con la obtención de datos en el paso siguiente.

A partir del objetivo específico número 4, en lo referente a la explotación del banco de ensayo, se incluyó además una línea de ensayo de los aspersores en condiciones de presiones menor a las convencionales, con el fin de disponer de la potencialidad de determinados aspersores para el uso en baja presión. Esta línea sólo supuso mayor número de ensayos pero en ningún momento cambios en la metodología de funcionamiento del banco. Los resultados esperados al inicio pretendían confirmar la viabilidad de una transición del riego a la baja presión con el propósito de perseguir grandes ahorros energéticos con la misma calidad de riego.

La variable perseguida en el trabajo ha sido la Uniformidad de Distribución, salvo en el objetivo 6, dónde se ha integrado también el coeficiente de uniformidad de Christiansen. Dado que estos ensayos se hicieron en colaboración con los agricultores y casas comerciales de riego existía un compromiso de transferencia al sector y por tanto ser éstos más comprensibles hacia los destinatarios del riego por aspersión.

Para disponer de una visión global del desarrollo de los trabajos de esta tesis, a continuación, se ofrece un esquema general. En dicho esquema se deja constancia de las diferentes tareas desarrolladas cronológicamente de arriba hacia abajo y en los sentidos de las flechas reflejadas.

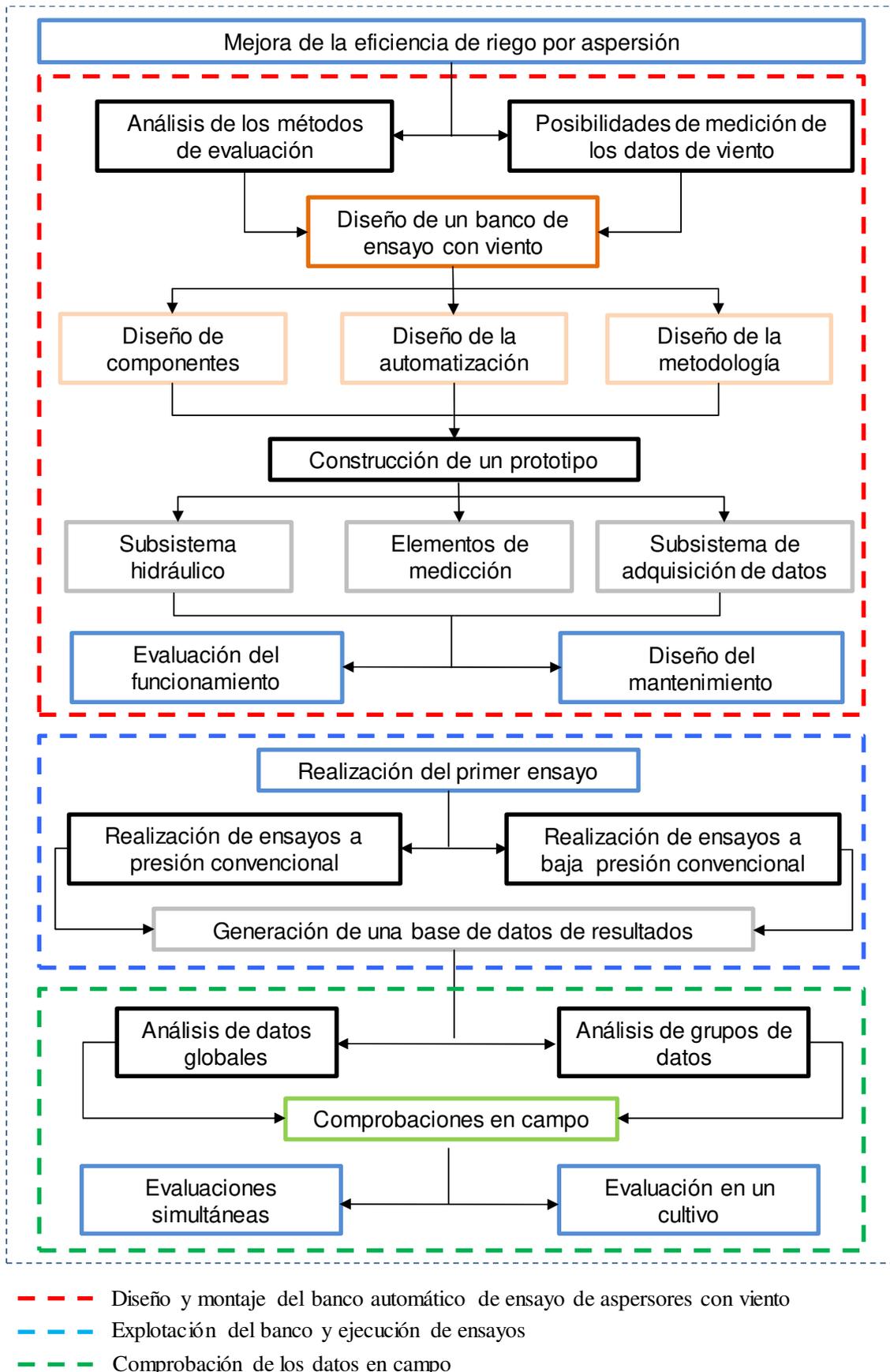


Figura 3. Esquema de la tesis

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la línea metodológica persigue obtener información sobre sistemas de aspersión en las explotaciones agrícolas, aportando información a agricultores y técnicos respecto a los factores que afectan a la uniformidad de riego e información técnica complementaria a la aportada por los fabricantes de aspersores.

El desarrollo de un banco automático de aspersión con viento y su explotación requirió de distintas fases bien diferenciadas y cronológicamente bien determinadas, pues de la evaluación de la fase precedente, depende la siguiente. Las fases por las que pasa el progreso del trabajo son las siguientes:

1. Diseño y construcción del banco de ensayos
2. Elaboración y puesta a punto del software utilizado
3. Explotación del banco y realización de los ensayos experimentales
4. Tratamiento de los datos obtenidos
5. Análisis de los datos conseguidos y potencialidad para otros estudios sobre riego por aspersión.

3.1. MATERIALES

En este apartado además de inventariar los materiales necesarios para el conjunto de la tesis, se indica su función en el sistema del banco automático de ensayo. Por tanto, la información de cada elemento descrito es ampliada en relación a la función que ejerce, en el apartado de Métodos.

3.1.1. Diseño y construcción del banco de aspersores

El grueso mayor del trabajo experimental fue conseguir todos los materiales necesarios para construcción del banco de aspersores. El IFAPA a través de una convocatoria interna de fondos FEDER para adquisición de infraestructura científico-técnica, aportó la mayor parte del presupuesto. Para el desarrollo del sistema se utilizó como modelo de evaluación el modelo matricial, teniendo en cuenta las normas ISO 7749-1:1986, ISO 7749-2:1990 e ISO 15886-3: 2012. Se parte de la evaluación de un aspersor aislado al aire libre, para conocer el patrón de distribución de un aspersor y recogiendo los datos de velocidad y dirección de viento. Todo a través de una red de pluviómetros cubriendo la superficie mojada del aspersor aislado.

El banco de ensayos se localizó en el centro IFAPA del término municipal de Chipiona, provincia de Cádiz, en una parcela libre de obstáculos (36.751351,-6.400386000000026), como podrían ser árboles o arbustos, los cuales impedirían la distribución del agua.

El terreno fue desbrozado y allanado a través de medios mecánicos con lo que se obtuvo una superficie con una pendiente inferior al 1% cumpliendo de esta forma la norma ISO 7749-2:1990 que estipula que la pendiente máxima no puede superar el 1%.

La norma ISO 7749-2:1990 especifica que las dimensiones del banco deben abarcar el diámetro de acción del aspersor a estudiar, más un margen adecuado para asegurar la cobertura total del diámetro mojado. Este margen no está especificado por la norma, así que se considera un margen mínimo de dos metros. El aspersor ensayado tiene un diámetro de acción máximo de 24 metros por lo que el banco de ensayos tiene un radio de cobertura de 15 metros logrando así cubrir el diámetro mojado y un margen de tres metros.

A continuación, se expone una descripción breve de los requerimientos de diseño, que posteriormente servirá para detallar cada uno de los componentes. Por tanto, las necesidades básicas a cubrir por el banco son:

1. Agua presurizada para el riego de un aspersor en condiciones de presión controladas.
2. Medición instantánea y continua de la distribución temporal y espacial de la lluvia del agua del aspersor. Para cumplir el objetivo de recoger en cada instante y en cada punto de muestreo el agua arrojada por el aspersor, se utilizaron pluviómetros automáticos que registran la cantidad y el tiempo en el que se recoge el agua. La figura 4 muestra la ubicación del aspersor en la malla de colectores, con una separación de 2 por 2 metros e interconectados entre sí electrónicamente. Teniendo en cuenta esto último y que el radio de cobertura de los aspersores es de unos 15 metros obtenemos un total de 176 pluviómetros.
3. Medición instantánea de la velocidad y dirección del viento mediante un sensor automático.
4. Obtención y procesamiento de datos. Todos los valores de precipitación instantánea de cada punto de muestreo y todos los valores de velocidad y dirección del viento deben almacenarse en un Sistema de Adquisición de Datos (SAD). Posteriormente, deben ser procesados para todos los resultados de la uniformidad del riego con respecto al viento registrada en muchas situaciones.

Para enumerar los materiales necesarios es imprescindible una descripción previa de la infraestructura del banco como sistema. Para ello se muestra la figura 5, en la que se incluye una imagen y un diagrama de los siete subsistemas que lo integran. Posteriormente se describe en cada uno de ellos sus componentes y sus funciones respectivas.

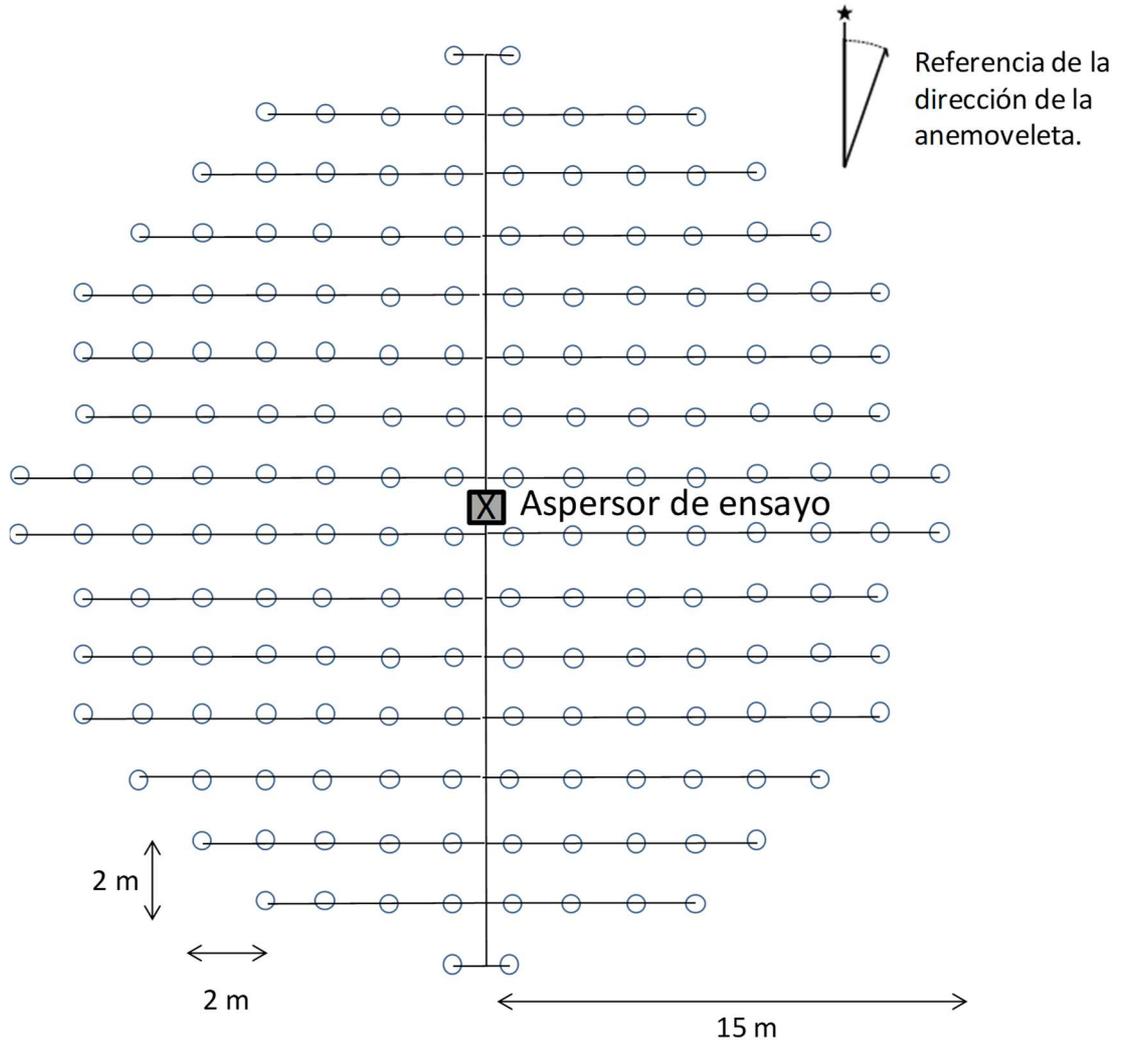


Figura 4. Diagrama de distribución de pluviómetros y el cableado con respecto a la ubicación del aspersor.

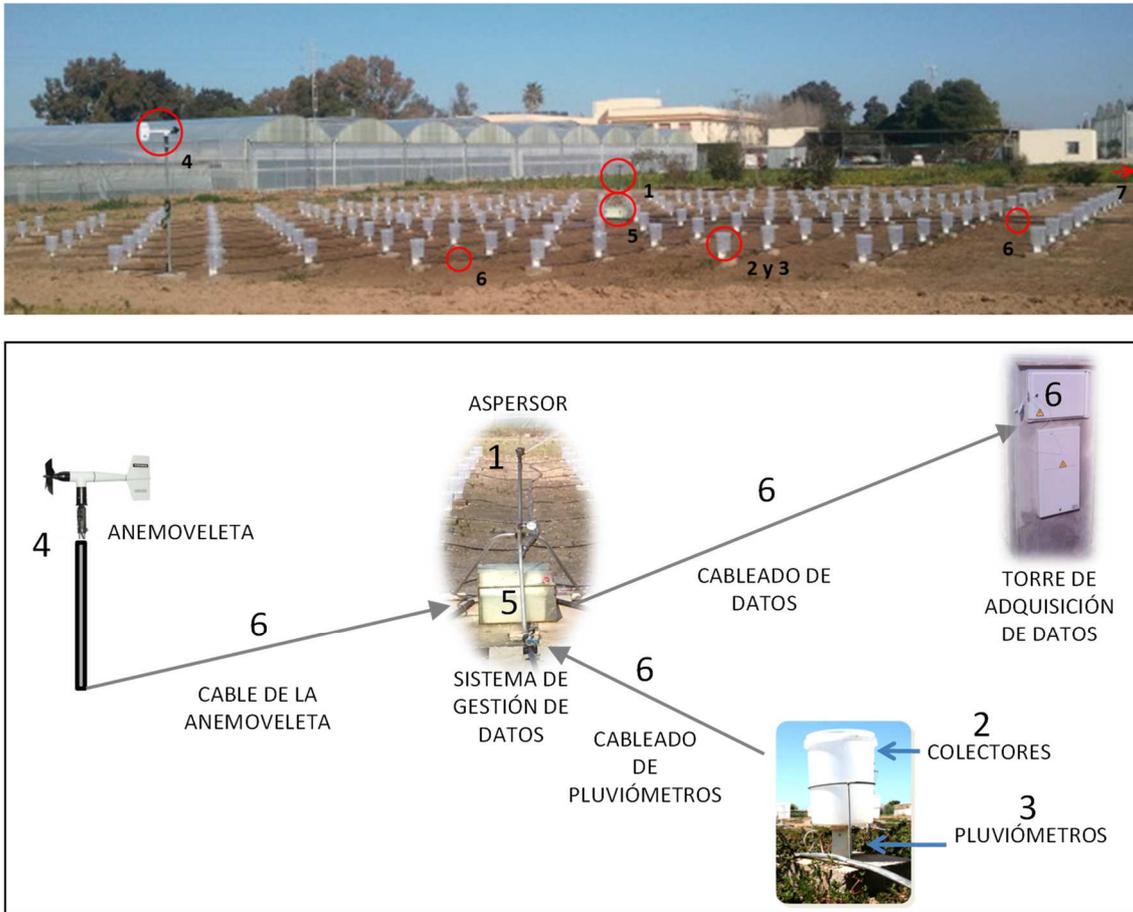


Figura 5. Fotografía y esquema del sistema banco de ensayo de aspersores con todos los subsistemas. (1) Circuito hidráulico: aspersor y toda la instalación necesaria, (2) Colectores de agua, (3) Pluviómetros automáticos, (4) Sensor de viento o anemoveleta, (5) Sistema de gestión de datos, (6) Cableado y (7) Torre para la adquisición de datos.

3.1.1.1. Subsistema hidráulico y de presurización

El sistema hidráulico del banco de pruebas comprende todo el sistema que sostiene el funcionamiento del aspersor en el ensayo. Según la norma ISO 15886-3: 2012, los cambios de presión en el ensayo no deben ser mayores del 2% durante todo el ensayo. Para ello, se monta una bomba exclusiva para el banco de 2,2 kW ("Prisma 35 N" de ESPA 2025, SL), que presuriza el agua y que junto con un regulador de presión aguas abajo permite una regulación precisa durante largos períodos de tiempo.

Para la adaptación de la curva de rendimiento del aspersor a la curva de demanda el sistema dispone de un bypass de retorno.

Posteriormente, un tubo de polietileno de 90 mm conduce el agua desde la bomba a dos caudalímetros en serie de 1 pulgada ("Arad M25" con una precisión de $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$) y previo al regulador de presión antes referido. En la parte final, un trípode soporta el aspersor de prueba, donde además se recoge la medición de presión con un manómetro de glicerina de 600 kPa. Con el regulador y el manómetro, se calibra la presión de trabajo objetivo del aspersor.



Figura 6. Apoyo del aspersor para el banco de prueba y SAD en una caja sellada.



Figura 7. Elementos de medición y control del banco. A la derecha el manómetro y a la izquierda uno de los caudalímetros.

Debido al encharcamiento que se produce en el suelo del banco de ensayos cuando se realiza un ensayo, se construyó un acceso consistente en una pasarela de hormigón que discurre desde el exterior del banco de ensayos hasta la unidad central donde se encuentra el aspersor y el sistema de adquisición de datos, facilitando de esta forma la entrada a la unidad central para el cambio de boquilla o de regulación de la presión.

3.1.1.2. Colectores

El elemento principal de recogida del agua para su posterior medición son los colectores distribuidos en toda la superficie de evaluación, que van colocados encima de cada pluviómetro y con la distribución que se muestra en la figura 8.

Los colectores son recipientes de plástico de 7,5 l, un diámetro interior de 0,21 m y una altura de 0,265 m. Sus dimensiones son compatibles con los requisitos de la norma ISO 15886-3:2012, donde se dice que: “Deberán ser cilíndricos al menos en el tercio superior de su altura, uniformes en forma y tamaño, y sus bordes abiertos, afilados y libres de deformidades, siendo su altura al menos dos veces la profundidad media del agua recogida durante el ensayo, pero no menor de 15 cm. El diámetro de la abertura estará comprendido entre su altura y la mitad de ésta, y no será menor de 8,5 cm”.

Como se puede apreciar en la figura 8, la función del colector es aumentar la superficie de la recolección de agua con respecto al pluviómetro automático puesto debajo. Esta función es utilizada para disponer de una mayor representatividad del agua recogida y de un aumento de la precisión de medida del pluviómetro automático.

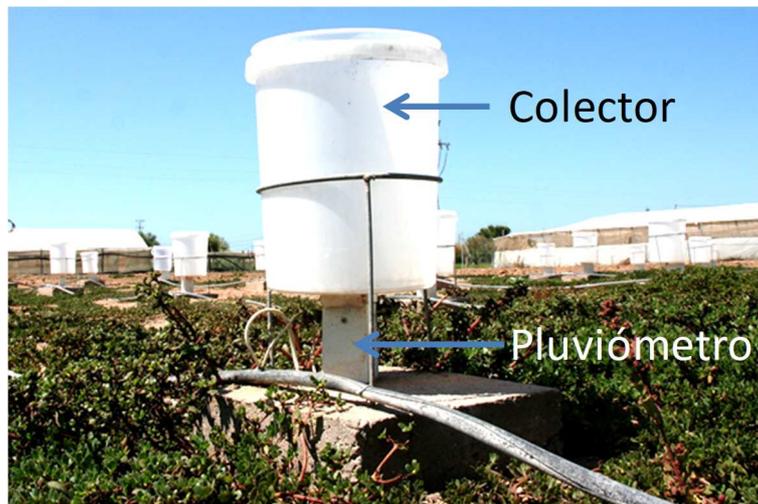


Figura 8. Colector unido a cada pluviómetro automático

3.1.1.3. Pluviómetros automáticos

Con el fin de medir el agua que se recoge en los colectores en cada punto de la zona de evaluación, se utilizan medidores automáticos de lluvia de cazoleta, con una precisión de $5 \cdot 10^{-3}$ l. Los pluviómetros automáticos utilizados son "Rain-O-Matic® Small (Pronamic A / S)". Son colectores individuales de forma prismática (0,1x0,1x0,05 m) con la forma en la entrada de agua troncal piramidal, donde el agua recogida se vacía en pequeños orificios que permiten su paso a la cazoleta basculante calibrada para un volumen de agua de 5 ml (figura 9).



Figura 9. Pluviómetro automático en la perspectiva de izquierda y derecha del indicador de lluvia planta sin la tapa superior.

3.1.1.4. Anemoveleta

Como se puede apreciar en la figura 10, se cuenta en el banco con una anemoveleta que mide en continuo las variables de velocidad y dirección del viento durante los ensayos de aspersores, y además los datos quedan registrados en el SAD con el conjunto de los datos de pluviometría del ensayo. Se utiliza un modelo de sensor de viento "05106 (Campbell Scientific)" compatible con el SAD utilizado (figura 11). Sus materiales están diseñados para la instalación al aire libre.

El cuerpo principal, la cabeza cónica, la hélice, la cola estabilizadora y otras partes internas son moldeados por inyección con plásticos resistentes a los rayos UV. La hélice y los ejes verticales van sobre unos cojinetes de acero inoxidable engrasados para proporcionar bajo par y proteger del ambiente.

Para medir la velocidad del viento la rotación de la hélice de 4 palas produce una señal eléctrica en corriente alterna, de frecuencia proporcional a la velocidad del viento. Para la medida de la dirección del viento la posición de la veleta es convertida por un potenciómetro de plástico conductivo de alta precisión de 10 kW de valor nominal, cuyo cursor es solidario al eje de la veleta. Cuando se aplica un voltaje constante, la señal de salida es una señal continua proporcional al ángulo medido.

El rango de medición de la velocidad del viento es de 0 a 100 m/s, con un margen de error de 0,3 m/s. La medida de la dirección del viento es de 0 a 6,28319 radianes con un margen de error de 0,0523599 rad.



Figura 10. Perspectiva de la anemoveleta.

3.1.1.5. Subsistema de gestión de datos

El sistema de gestión de datos está constituido principalmente por un Sistema Adquisición de Datos (SAD) en sí; es el subsistema del banco de ensayo donde se recogen todas las señales eléctricas de los sensores (anemoveleta y pluviómetros) y son convertidos y almacenados como variables de los ensayos. Está diseñado y programado para obtener datos de 178 sensores, de los cuales dos corresponden a los datos de la dirección y velocidad del viento y el resto a 176 datos de pluviómetros. El SAD está

montado dentro de una caja de intemperie situada bajo el portaspersor (Figura 6), donde llega la red de cables de los pluviómetros y de la anemoveleta.

Para la adquisición y almacenaje de los datos de los ensayos se incluyen los siguientes componentes:

- Una caja de intemperie "LE129GX (Campbell Scientific)" que aísla todos los componentes electrónicos del SAD de condiciones de humedad del exterior. Para evitar la acción directa del agua, este recinto exterior está cubierto además por una carcasa externa rígida de su propia fabricación que protege a su vez a la caja de intemperie.
- Registrador de datos o datalogger (DL) modelo "CR1000 (Campbell Scientific)", con 8 entradas de datos. Está conectado a las entradas de los cables de la anemoveleta y a los módulos expansión que recogen los datos de cada uno de los 176 pluviómetros. Este DL incluye un microcontrolador, un reloj interno, una unidad de almacenamiento de datos, una interfaz para la comunicación con un ordenador portátil que recoge los datos y una consola para conectar los sensores. Todo el material utilizado se encuentra descrito en el manual de instrucciones del DL (Campbell Scientific, 1995)
- Trece módulos de expansión (ME) de datos "SDM-IO16 de 16 canales de entrada / salida (Campbell Scientific)", con 16 entradas cada uno, lo que permite la adquisición de datos de las 176 entradas de pluviómetros automáticos. Los módulos de expansión se conectarán en paralelo a través de 3 entradas en el DL.



Figura 11. Imagen del DL CR1000 a la izquierda y del ME SDM-IO16 a la derecha

3.1.1.6. Cableado

Todos los medidores están conectados con el SAD por medio de hilos. Uno envía voltaje desde el SAD al colector y las otras pulsaciones de teclas recogidas por los pluviómetros hasta el SAD. El cableado es como se muestra en la Figura 4, donde el cable de voltaje es común y el otro es individual para cada pluviómetro y ambos corren por la trayectoria indicada en esa figura, y dirigidos todos hacia el SAD, recubiertos todos con tubo de polietileno de 12 mm.

Para la instalación del cableado según la figura 4 se utilizaron 3.834 m de manguera de cable de cuatro hilos de 0,51 mm² y 136 m de dos hilos de 0,51 mm² igualmente. Todo según la metodología de conexión que se explica más adelante.

3.1.1.7. Torre de adquisición de datos

Fuera del área de prueba se construye una torre tal y como se aprecia en la figura 5 y con una doble función: (1) de regulación y suministro de energía, y (2) punto de conexión al ordenador portátil para acceder al SAD. Está conectado al SAD por medio de dos alambres, uno de potencia y otro de comunicación (RS232). De esta forma se facilita la recogida de datos y la conexión en línea desde el exterior del banco de ensayo, permitiendo de esta forma poder conectar el portátil al datalogger sin tener que ir a la unidad central del banco de ensayo.

3.1.2. Software

Tanto la recolección, el tratamiento y el análisis de los datos están completamente informatizados. Desde la programación del software interno del DL, hasta los resultados de la uniformidad obtenida de las diferentes configuraciones de riego por aspersion, se han utilizado diferentes softwares enlazados.

A continuación, se explica los diferentes programas usados en orden cronológico a lo largo de una jornada de ensayo:

3.1.2.1. Gestión de datos del DL

Dos programas de software de Campbell Scientific se han utilizado para la gestión del DL:

- “Short Cut 3.2.2” es el editor de programas para el DL que ha permitido desarrollar el programa recogido en el Anexo I y que gestiona las señales de todos los sensores y el almacenamiento de los datos en el DL.
- “LoggerNet 4.4” permite comunicación con el DL y la descarga de los datos al ordenador portátil.

3.1.2.2. Procesamiento de datos

Con el diseño y la arquitectura de automatización definidas, una de las tareas más importante es la gestión de los datos obtenidos. Para ello y para todo lo que es la selección de datos, la creación de tablas y gráficos de los resultados, así como el procesamiento de datos, se usa una hoja de cálculo (Microsoft Excel 2010), cuyo fin último es la obtención de los datos con la estructura necesaria para el programa de simulación de aspersores de riego. Esta hoja de trabajo tiene la función principal de seleccionar varios grupos de datos referidos cada uno de ellos a ensayos en condiciones de viento distintas, como resultado de un funcionamiento continuo del banco de riego durante un día completo. Por tanto, cada día de riego las condiciones son variables en el tiempo y se eligen intervalos temporales donde la dirección y la velocidad del viento tienen pocos valores cambiantes y según un criterio de variabilidad restringida prefijado en la hoja de cálculo.

3.1.2.3. Solapamiento de los resultados en diferentes marcos

Una vez clasificada la información de cada uno de los ensayos de una jornada de ensayo, es necesario un software para solapar los datos de un aspersor aislado en las múltiples condiciones de campo. Para ello se utiliza el software SpacePro 3.0. (Centro de Tecnología de Riego, Universidad de Fresno, EE.UU.). Este software permite un amplio rango de configuraciones y combinaciones utilizando las variables de marco de aspersión y la dirección del viento deseada.



Figura 12. Programa de solapamiento de resultados del ensayo de un aspersor aislado

Los resultados finales como consecuencia de aplicar este software es una cuantificación de la uniformidad de riego para cada configuración deseada dando lugar a: la Uniformidad de Distribución, UD (Merriam y Keller, 1978), el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen, CU (Christiansen, 1942), la Pluviosidad en mm/h y el Coeficiente de Programación (Scheduling Coefficient, SC) sobre el 5% de la superficie (Butter, 1990; Zoldoske et al., 1994).

3.1.2.4. Clasificación y análisis de los resultados

Los ensayos que se realizan generan una amplia cantidad de resultados debido a las posibilidades de solapamiento de marcos y direcciones de viento que se simulan. Tal cantidad de resultados finales podrán ser utilizados en función de dos grupos de operaciones distintos:

1. Consultas individuales con capacidad de comparación entre resultados concretos. Para ello, fue básico clasificar los resultados en un programa de base de datos, utilizando en este caso el programa Microsoft Access 2010. Esto permitió disponer una herramienta de consulta en la que se puede actuar desde cualquier criterio de búsqueda y/o clasificación.
2. Estudios de comportamientos de grupos de resultados. Esta tarea requiere de una gestión más compleja de los resultados donde se realiza una clasificación previa de todos los resultados. Para ello es necesario haber completado el primer paso.

Posteriormente, se abordan las posibles influencias de las variables para conjuntos de aspersores o situaciones en los que se busquen reglas más generales de comportamiento. Para ello se utilizó el análisis de regresiones lineales múltiples, utilizando el programa informático Statistix 9.0.5.

3.1.3. Explotación del banco

El funcionamiento continuo en la actividad de ensayar aspersores requiere una serie de materiales relacionados con las siguientes actividades:

- Calibración periódica del banco de ensayo. Consiste en una calibración periódica que permita la calibración de cada uno de los pluviómetros de manera rápida. Para ello se requiere una probeta de medida de 250 ml, o si se utilizan periodos de lluvia en época de precipitaciones se utilizarán cuatro colectores fijos situados en el área del banco y distribuidos en los centros de cada cuarto del círculo del área de los pluviómetros. Esta agua recogida servirá como medidas de referencia de lluvia para cada grupo de pluviómetros.
- Toma de datos de los ensayos. Ésta se hace después de cada jornada de ensayo y requiere de la obtención de los datos almacenados del SAD durante el día. Para ello es necesario contar con un cable de comunicación RS232 o cable de puerto serie de longitud mayor a la del radio del área de evaluación que permita conectar en un lugar fuera de la zona mojada a un ordenador portátil que recoge los datos del SAD.
- Mantenimiento. Esta labor se centra en la limpieza de los pluviómetros, disponiendo de una manguera de 20 m de longitud con una válvula manual.

3.1.3. Ensayos alternativos

Para la explotación del banco se marcó el objetivo de conseguir una capacidad de asesoramiento futura y por tanto pusiera a prueba de manera real el potencial de información que se genere. Por tanto, para el estudio completo se contó además del banco de ensayo construido con el siguiente material:

- Una instalación con un banco convencional de ensayo radial sin viento. Esta instalación se ha usado como banco adicional para obtener datos complementarios de resultados de uniformidad de riego sin viento. Estos ensayos se realizan según las normas ISO 7749-2:1990 e ISO 15886-3:2012, en un lugar cerrado, para lo que se ha requerido de los siguientes materiales:
 - Una nave cerrada.
 - Una toma de agua a presión.
 - Un regulador de presión.
 - Un trípode porta-aspersor.
 - Un manómetro de glicerina.
 - Pluviómetros, de forma cilíndrica y tamaño uniforme (0,21 m de diámetro y 0,265 m de altura), con los bordes agudos y sin deformaciones distribuidos tal y como se muestra en la figura 13.

- Probeta graduada en escalas de 1 ml



Figura 13. Imagen del banco de ensayo radial sin viento.

- Material de evaluación de ensayos de campo. A partir de los datos del banco de ensayo, en determinadas ocasiones, será necesario la tarea de contrastación con valores en campo. Por tanto, habrá de contar con un equipo con los siguientes elementos y según el protocolo del Sistema de Asistencia al Regante (SAR, 2014):
 - Manómetro de aguja en baño de glicerina con acoplamiento para boquilla de aspersor o Tubo de Pitot.
 - Cronómetro.
 - Manguera flexible de unos 2-3 cm de diámetro y 2.5 m de longitud.
 - Bidón de plástico de al menos 10 l de capacidad.
 - Pluviómetros de forma cilíndrica y tamaño uniforme (0,21 m de diámetro y 0,265 m de altura), con los bordes agudos y sin deformaciones.
 - Probeta graduada en escalas de 1 ml.
 - Cintas métricas de 25 m y 2 m.
 - Veleta y anemómetro con asta de 2 m.
 - Calibre de precisión o juego de galgas para medir el diámetro de las boquillas.
- De manera específica para el estudio del riego por aspersión en condiciones de baja presión y para una campaña de cultivo, se contó con material adicional para la regulación y el control de presión en las instalaciones de riego. Dicho material fue conseguido gracias a la colaboración tripartita entre IFAPA, AIMCRA y las empresas fabricantes y distribuidoras de aspersores. En dicha colaboración se consiguió:
 - Contadores tipo woltman
 - Pilotos reguladores de presión y válvulas hidráulicas
 - Programadores de riego.
 - Aspersores suficientes para ensayar sectores completos.

3.2 MÉTODOS

El desarrollo metodológico de este trabajo implica una sectorización por fases al igual que el planteamiento general de la Tesis. Por tanto, y según los objetivos específicos descritos al inicio, se han desarrollado bloques diferenciados de contenidos que responden a la cronología del trabajo y a los objetivos antes señalados, que van desde el diseño y montaje del banco hasta la comprobación de los datos en campo. Pasando todo ello por la elaboración de la metodología de funcionamiento del banco, la planificación de los ensayos, la interpretación, la clasificación y el análisis global de los resultados.

3.2.1. Diseño y montaje del banco

Para cubrir el primer objetivo específico marcado (Construcción de un prototipo de banco automático de ensayo de aspersores al aire libre) era muy necesario conocer qué datos finales obtener y qué procedimiento utilizar. Por ello, el procedimiento documentado al respecto es la Norma ISO 15886-3: 2012, la cual está diseñada para un ensayo matricial sobre un aspersor aislado. Sin duda, la operación sobre esta metodología es de forma manual y sobre dos momentos de actuación sobre cualquier prueba de evaluación: al inicio (colocación de pluviómetros y aspersor y puesta en marcha del aspersor) y al final (corte del riego y lectura manual de las cantidades de agua recogida en cada pluviómetro). Por tanto, en este método convencional puede mejorarse la precisión en los resultados y la eficacia en el manejo a través una asistencia automatizada. El diseño de este nuevo concepto de banco es lo que nos lleva a perseguir estas dos cualidades: precisión y eficacia. Para ello, se propusieron dos fines: la automatización de la lectura de los pluviómetros y una medición instantánea. Esta última característica permitirá lo perseguido en el objetivo principal de este trabajo, la relación de la uniformidad de riego en función de la dirección y velocidad del viento.

Además de estas premisas de diseño, con la construcción de este banco se consigue con respecto a un banco manual convencional lo siguiente:

- Controlar la variabilidad de las condiciones climáticas durante la prueba utilizando un sensor de velocidad y dirección de viento
- Evitar la diferente velocidad de evaporación en los colectores periféricos, por lo cual la medida ha de ser instantánea con respecto a las centrales.
- Una alta eficacia en la realización de ensayos con bajos requerimientos de mano de obra.

Como estructura principal del banco existen dos subsistemas (hidráulico y de gestión de datos) que determinan el funcionamiento y automatización del mismo. Con los materiales descritos vamos a ver su funcionamiento y la conexión entre ambos.

3.2.1.1. Subsistema hidráulico y de presurización

En el siguiente esquema está aislado todo el sistema que garantiza el funcionamiento estable del aspersor durante todo el periodo de prueba.

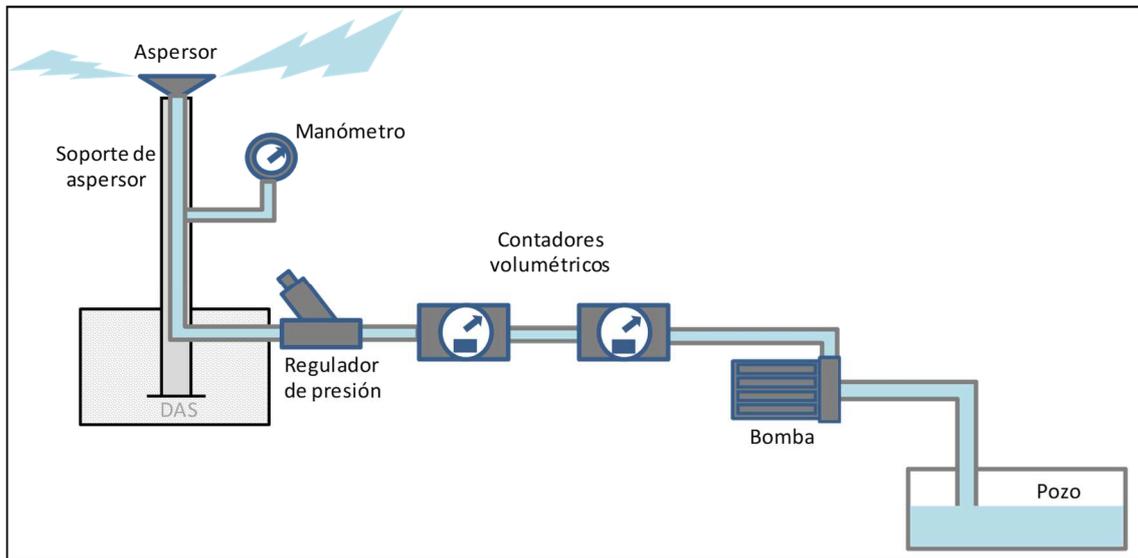


Figura 14. Esquema hidráulico del banco de pruebas.

El sistema comienza a funcionar desde el momento en que se acciona la bomba mediante el interruptor situado en la torre de adquisición de datos. Para una jornada de funcionamiento se toma lectura de los dos caudalímetros en serie, donde se tendrá una doble lectura para mayor seguridad. Inmediatamente después se actúa sobre el regulador de presión situado a los pies del trípode porta aspersor, donde se fija la presión sobre el manómetro del porta aspersor.

3.2.1.2. Subsistema de adquisición de datos

Contando con el funcionamiento continuo del aspersor a la presión deseada, se va a describir la toma de datos automática del agua que se recoge en cada punto y las condiciones de viento de cada momento del ensayo.

Para el primer caso, y en referencia al agua que se recoge, el balanceo en el auto vaciado del pluviómetro automático emite un pulso eléctrico que se cuenta, se transmite a través del cableado, y es registrado por el SAD en el momento en que se produce el vaciado. Esta información corresponde a un volumen de agua de 5 ml y representa una lámina de agua en función del tamaño de la superficie del colector. En este caso disponemos de un colector de diámetro 0,21 m. La superficie de recogida en este caso será de 0,034 m² (superficie del círculo correspondiente). Dividiendo el volumen correspondiente a cada pulso entre la superficie del colector obtenemos que cada pulso representa una lámina de agua de 0,144 mm.

En la correspondiente entrada del Módulo de Expansión (ME) se recoge cada impulso de cada pluviómetro a través de la transmisión vía cable. Esta entrada es identificada, registrada y clasificada por el Data Logger (DL). Cada medición se registra en la memoria del DL donde se organiza por fecha y hora gracias al reloj interno. La

conexión con un ordenador portátil permite la transferencia de datos además de un control en tiempo real del sistema cuando así lo requiera. En el siguiente esquema se detalla el flujo de la información en los componentes del SAD.

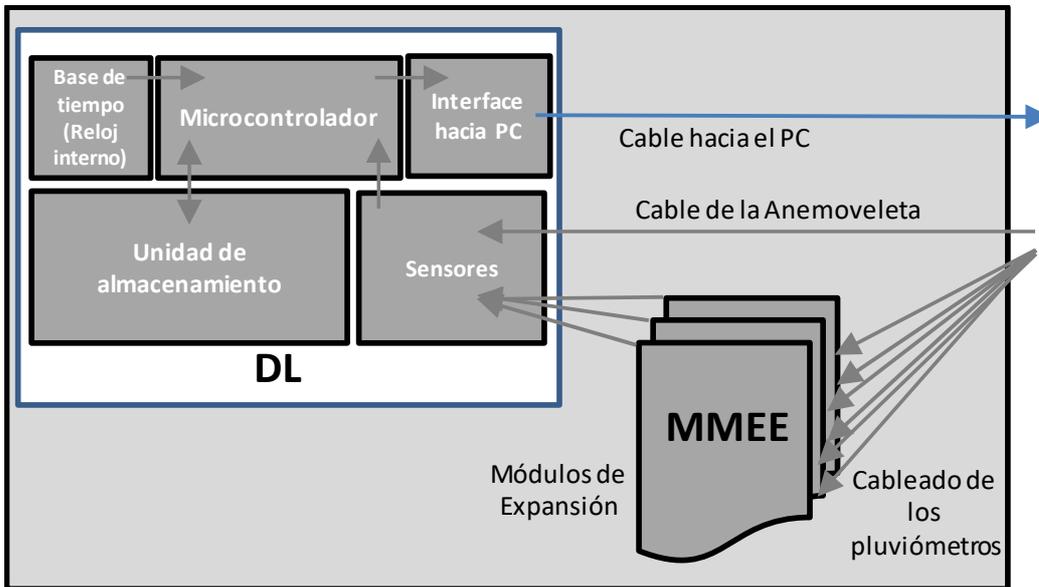


Figura 15. Esquema del sistema de adquisición de datos (SAD).

La conexión entre el ME y los pluviómetros es por parejas (pluviómetros primarios y otro satélite) para optimizar el costo del cableado entre el SAD y los pluviómetros. Posteriormente, el primer ME se conectará directamente al DL y los restantes se conectarán entre ellos en cascada y en paralelo (Figura 16).

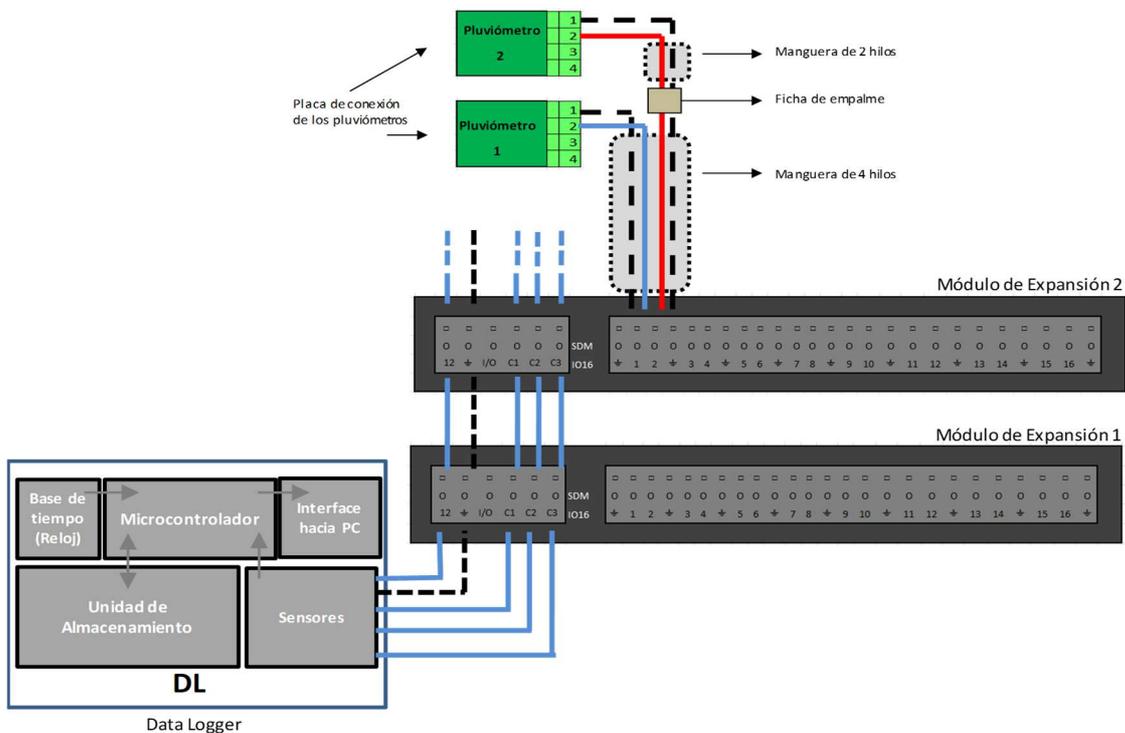


Figura 16. Esquema de conexión entre los módulos de expansión y una pareja de pluviómetros.

El Módulo de Expansión SDM-IO16 es un módulo que aumenta la capacidad de entrada y/o salida de datos de los DL Campbell Scientific. Cuando un puerto es configurado como una entrada, cada puerto puede monitorizar el estado lógico, contar pulsos, medir frecuencia de señales y determinar un ciclo de trabajo.

Para el segundo caso, y en relación a las condiciones de viento, éstas son recogidas directamente en las entradas del DL. Esto se hace a través de un cable de cuatro hilos, desde la anemoveleta hasta el SAD.

3.2.2. Clasificación de las variables

Como segundo objetivo de la tesis se ha propuesto la elaboración de una metodología de ensayo de aspersores en condiciones de monitorización del viento y toma de datos automatizada. El fin último del banco de ensayo de aspersores es tener evaluada la calidad del riego en cualquier situación real que se pueda reproducir en el campo. En tal caso, se hace necesario definir la variable dependiente uniformidad de riego y los factores que intervienen en ella, como: viento, marco de aspersores, presiones y modelo y tipos de boquillas instaladas. A continuación, se define la uniformidad del riego y todas las variables que definen los factores anteriores.

3.2.1.2. Uniformidad del riego

Conceptualmente, la idoneidad de un riego depende de: el incremento del agua almacenada en la zona radicular del cultivo producido por el riego, las pérdidas por percolación profunda y por escorrentía superficial, la uniformidad de la lámina infiltrada y el déficit de humedad del suelo después del riego. Pero a efectos de sólo contar con el sistema de riego la UD queda reducida a la distribución de agua al regar contemplada a través de la ecuación 1.1.

Normalmente, para las evaluaciones de los ensayos de riego en campo se utiliza la metodología propuesta por el Sistema de Asistencia al Regante (2014). En la siguiente figura se esquematiza la distribución de la lámina de agua en cuatro aspersores de un sistema de riego en campo.

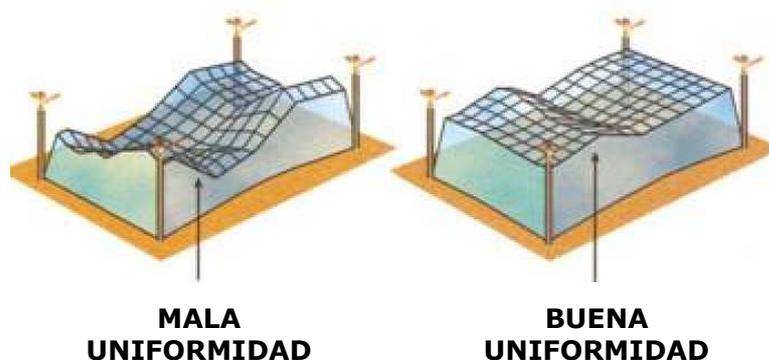


Figura 17. Representación gráfica de la uniformidad de distribución (Salvatierra, 2012)

Hay que tener en cuenta que, optando por una uniformidad alta, se estará eligiendo una instalación de riego que ahorrará agua e incrementará la producción de los cultivos, lo que siempre es necesario. Pero también será mayor el coste de la instalación ya que las presiones deberán ser más uniformes, mayores los diámetros de tuberías, se necesitará mayor longitud de tubería, serán necesarios reguladores de presión, etc.

En cualquier caso, la uniformidad de distribución deberá ser mayor o igual que el 75% (tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los valores de UD en función de la calidad del riego (Sistema de Asistencia al Regante, 2014).

Uniformidad de Distribución	Valor de UD
Mala	Menor del 75%
Aceptable	De 75% a 80%
Buena	De 80% a 85%
Excelente	Mayor de 85%

3.2.3.4. Aspersores

El principal factor que define la uniformidad en unas condiciones determinadas es el modelo de aspersor junto con la combinación de boquillas instalada. La arquitectura del aspersor y su dinámica de giro definen han sido diseñados y construidos para alcanzar la mayor uniformidad de riego. Pero sólo esto no garantiza una buena uniformidad, como se demuestra en este trabajo.

Desde el punto de vista del aspersor existe un factor de clasificación relacionado por método de giro. En los aspersores agrícolas se definen dos grandes grupos:

- De impacto
- Rotativo o de reacción

En la figura 18 se muestra un aspersor de impacto de círculo completo con una rosca en la base para la inserción a la caña de la tubería de $\frac{3}{4}$ " macho o hembra (modelo F46). Suelen tener doble boquilla, principal y secundaria. Ambos ángulos de la trayectoria inicial del agua son de boquilla 23° sobre la horizontal. La mayoría suelen estar fabricados en resina acetálica antiabrasiva con tratamiento protector a los rayos ultravioletas y codificada por color y medidas grabadas en milímetros y pulgadas para una inequívoca identificación. El mecanismo de impacto es un eje brazo y muelles en acero inoxidable.



Figura 18. Imagen de un aspersor convencional de impacto.

En la figura 19 se muestra el aspersor rotativo o de reacción, que es una evolución del anterior y produce un chorro fuerte y compacto sistemáticamente interrumpido por un difusor, lo que permite rellenar los patrones del agua. Además, distribuye gotas ligeras con su movimiento amplio, evitando sellar el suelo.



Figura 19. Imagen de un aspersor rotativo.

3.2.3.5. Boquillas y accesorios

Para obtener una mayor eficiencia en el riego del cultivo es imprescindible una buena elección de la boquilla a usar. Existen diferentes boquillas que dan varias posibilidades al agricultor (caudal, alcance y morfología del flujo de agua) sin tener que cambiar de modelo de aspersor. De la misma manera que existen accesorios que modifican el chorro de agua con un objetivo determinado de forma. Estos elementos

satisfacen las diferentes necesidades, que varían en función del suelo, clima y de la propia naturaleza del cultivo. Pero el principal objetivo es conseguir una buena uniformidad de riego para el marco de aspersores instalado.

- Boquillas:

Para los aspersores de impacto se suelen usar boquillas de rosca de plástico. Para boquillas principales son boquillas roscadas del tipo “3PRN”, y para las boquillas secundarias las del tipo “3PSN” (figura 20).



Figura 20. Tipos de boquillas 3PRN como principales y 3PSN como secundarias (Fuente: boletín técnico n° 0920 de la empresa Unirain, www.unirain.com)

Suelen estar fabricadas en resina acetálica antiabrasiva, su alta resistencia a la erosión las hace muy indicadas para un funcionamiento prolongado.

Gracias a su codificación por colores, es fácil identificarlas a simple vista. Incluyen sus medidas respectivas grabadas en pulgadas y en milímetros.

La boquilla secundaria más común es la 3PSN 3/32” (figura 21) cuyo diseño ranurado mejora el riego en las zonas cercanas al aspersor, incrementando la uniformidad.



Figura 21. Boquilla secundaria 3PSN 3/32” (Fuente: boletín técnico n° 0920 de la empresa Unirain, www.unirain.com).

Otro tipo de boquillas cada vez más extendidas son las boquillas de bayoneta. Son también de plástico y disponen de una arquitectura algo distinta con el fin de facilitar el cambio en el aspersor. Estas boquillas suelen ser específicas para cada fabricante de aspersores y pueden tener orificios de salida con distintas geometrías como puede apreciarse en la figura 22.



Figura 22. Imagen de boquillas de bayoneta (Fuentes: www.unirain.com y ww.vyrsa.com respectivamente).

- Accesorios:

Además de la combinación de aspersor boquilla, existen accesorios diversos que puede intervenir en la uniformidad de riego de los aspersores. Entre otros están: vainas de boquillas, reguladores de presión, dispositivos antidrenantes, pantallas sectoriales, etc.

El accesorio más usado es la vaina introducida entre la boquilla y el aspersor; este tipo de accesorio se suelen usar en las boquillas de rosca, pues las boquillas de bayoneta suelen tenerlas incorporadas en su estructura. La función de este tipo de accesorio es darle al chorro de agua unas propiedades definidas. Existen distintos tipos en el mercado, pero las más utilizadas son la vaina prolongadora de chorro y la vaina dispersadora de chorro.

La función de la primera es compactar más el chorro de salida asegurando a la salida un régimen laminar del agua. El objetivo principal en este caso es combatir mejor las condiciones de viento y asegurar el alcance del chorro en estas condiciones.

La vaina dispersadora de chorro persigue otra función distinta, que es asegurar el reparto de agua en las cercanías del aspersor. Esta situación es buscada para condiciones de presiones bajas, marcos pequeños con aspersores de una boquilla o en condiciones de poco viento.



Figura 23. Vaina prolongadora (izquierda) y dispersadora de chorro (derecha) (Fuente: www.unirain.com).

4.2.3.3. Presiones de trabajo

La presión del agua es una magnitud que influye decisivamente en la uniformidad del riego en combinación con las demás variables. La presión del agua está directamente relacionada con el alcance del agua y con el tamaño de gotas de salida de éstas. Ambos conceptos determinan la uniformidad de un sistema de riego. Las presiones utilizadas se adaptarán a las comúnmente usadas en las fincas agrícolas. Estas presiones rondan desde los 250 hasta los 350 kPa en la mayoría de los casos. La variable presión está íntimamente relacionada con el gasto energético del sistema de riego. Debido a que el coste de la energía es el gasto de operación más importante en el riego por aspersión, es necesario trabajar en nuevos aspersores y boquillas para trabajar a baja presión manteniendo o mejorando el reparto del agua. Este va a ser uno de los usos más interesante para los ensayos de aspersores, como se detalla en los resultados de este trabajo. Se ha planteado como objetivo de reducción valores de hasta 200 kPa de presión.

3.2.4.1. Tipos de viento

El viento, tanto en intensidad como en dirección, es el principal factor que distorsiona la uniformidad de distribución, y juega un papel importante en las pérdidas por evaporación y arrastre durante el proceso de aplicación de agua.

Los sistemas de riego de aspersión suelen trabajar a una velocidad de viento en el rango de 0-4 m/s. Se puede considerar que vientos superiores a 4 m/s conllevan una distorsión en la distribución del agua por parte del aspersor tan acentuada que sería imposible evaluar la tendencia de ésta sobre el aumento en la velocidad del viento. Por tanto, consideraremos como nulos aquellos ensayos en los que exista viento racheado. De este modo clasificaremos los vientos en 4 tipos dependiendo de su velocidad.

- Leve: cuando la velocidad media del viento no supera los 2 m/s.
- Moderado: cuando la velocidad media del viento supera los 2 m/s pero no sobrepasa la velocidad de 4 m/s.
- Fuerte: la velocidad del viento sobrepasa los 4 m/s.
- Racheado: la desviación típica de la media de velocidad de viento durante el ensayo es mayor de 20 % y su velocidad media supera los 4 m/s.

3.2.4.1. Dirección del viento

Dentro y en cada uno de los tipos de velocidades de viento, se incluye la variable “Dirección del viento” (DV) que es la dirección de ataque del viento respecto a las líneas de aspersión que conforman los marcos posteriormente simulados con la ayuda del programa SpacePro 3.0 en el cual podremos modificar el ángulo de entrada del viento. Tomando como referencia la Figura 24, se pueden considerar tres tipos de direcciones:

- Viento paralelo a la línea de aspersión: vector de velocidad media del viento forma ángulo cero grados (0 rad) respecto a la línea de cultivo, con una desviación típica no mayor del 20%.
- Viento oblicuo a la línea de aspersión: vector de velocidad media del viento durante el ensayo forma un ángulo de 45 grados (0,78 rad) respecto a la línea de aspersión, con una variabilidad del 20%.
- Viento perpendicular a la línea de aspersión: vector de velocidad media del viento perpendicular a la línea de aspersión ($90^\circ = 1,57$ rad), con una variabilidad del 20%.

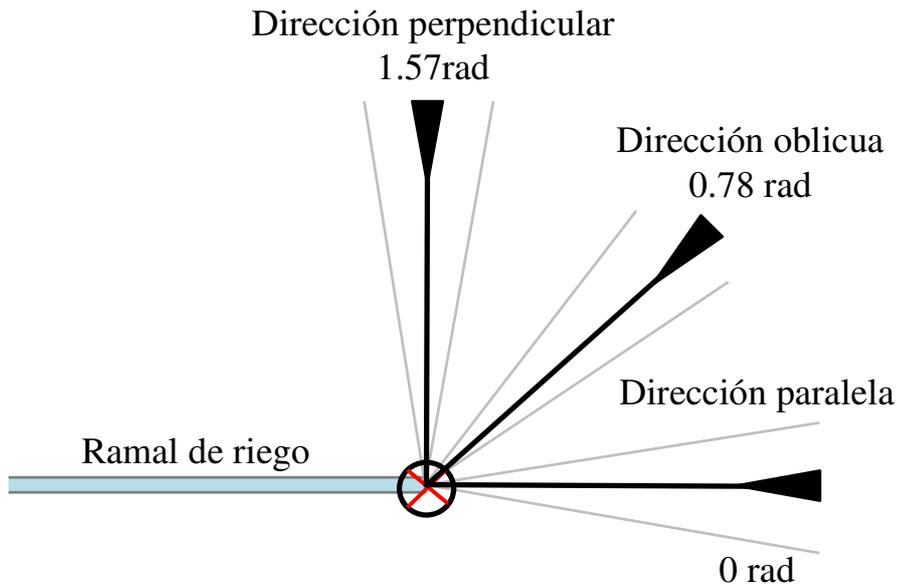


Figura 24. Estandarización de las direcciones del viento relativas con respecto a la rama de riego para los resultados finales de los datos.

3.2.3.2 Tipos de marco

El marco de riego es una de las variantes posibles en estos ensayos. Se procesan los datos obtenidos en cada uno de los ensayos a través del SpacePro 3.0 para obtener los resultados de cada tipo de marco y dimensiones de este.

Para la obtención de los resultados de este proyecto introduciremos en el SpacePro 3.0 la variante de marco rectangular y marco triangular con dimensiones de 10x10 m² hasta 18x18 m² para ambos tipos de marco. De esta forma logramos saber cuales son las uniformidades de distribución (UD) para cada combinación boquilla-presión ensayada.

En el anexo II disponemos de todas las tablas de uniformidad de distribución para cada tipo y tamaño de marco, dependiendo del tipo de boquilla usada, dirección de ataque del viento respecto a las líneas de aspersión y presión a la que se ha realizado el ensayo.

3.2.3. Operaciones de uso del banco

Un objetivo específico importante es la comprobación del funcionamiento del banco y de la metodología con ensayos reales. Una vez completada la construcción del banco de ensayo comenzaron las tareas de uso. Sobre ello se distinguen tres actividades: la puesta a punto inicial, la realización de ensayos y el mantenimiento.

3.2.3.1. Puesta a punto

La puesta en funcionamiento del banco llevó dos tareas necesarias para contar con resultados precisos: la comprobación del funcionamiento y la calibración, ambas realizadas de manera consecutivas.

La comprobación del funcionamiento se hizo con una revisión visual de todas las conexiones; posteriormente se conectó el ordenador portátil al SAD en el modo de visualización de datos a tiempo real y se comprobó para cada uno de los pluviómetros su funcionamiento y conexión. De esta forma se añadía una pequeña cantidad de agua y simultáneamente otra persona verificaba la señal en el ordenador portátil

En esta fase se buscaba identificar posibles anomalías físicas del conjunto colector-pluviómetros, dónde se identificaron contactos eléctricos deficientes para su reconexión.

Una vez realizada la comprobación se procedió a la calibración inicial del banco completo. El objetivo de esta tarea fue ajustar para cada pluviómetro instalado un coeficiente de ajuste de la ganancia de corrección de la lluvia aplicada y la medición de la lluvia. De acuerdo con las especificaciones técnicas del pluviómetro automático, un pulso debe corresponder a un volumen de 5 ml de agua. Para su ajuste y debido a la imprecisión para un uso prolongado, se realizó el siguiente procedimiento en cada calibración: se enciende el banco sin aspersor y se vierte en cada pluviómetro 250 ml de agua en un tiempo de 2,5 min (3 s por pulso) simulando el caudal máximo que puede dar un aspersor y que no excede el rango de capacidad de medición proporcionado por el fabricante del pluviómetro. Una vez proporcionada la cantidad en todos los medidores, se descargan los datos del SAD y se calcula el coeficiente de corrección para cada pluviómetro que se aplicará posteriormente a todas las mediciones. Además, esta tarea le permite identificar aquellos pluviómetros que no funcionan para ser reemplazados antes del inicio del nuevo ciclo de ensayos.

Para la puesta en marcha del banco se hicieron tres calibraciones consecutivas con el objeto de ir corrigiendo posibles anomalías físicas del conjunto colector-pluviómetros, fundamentalmente por periodos largos de inactividad. Las anomalías más frecuentes y sus soluciones fueron:

- Deposición y formación de barro en la cazoleta del pluviómetro automático. Para ello, se estableció una limpieza con agua a presión como solución y como labor de mantenimiento semanal.
- Obstrucción de los pluviómetros producidos por fauna espontánea fundamentalmente por caracoles; para ello se ha de llevar un mantenimiento con productos helicidas de liberación lenta.

Los dos problemas anteriores quedaron eliminados tras la segunda calibración y dejando finalmente como definitiva los resultados obtenidos en la tercera calibración donde el promedio de los coeficientes de calibración fue de 0,93. A continuación se muestra en la figura 25 la media de los coeficientes de calibración y sus desviaciones de las tres calibraciones hechas en la puesta a punto del banco.

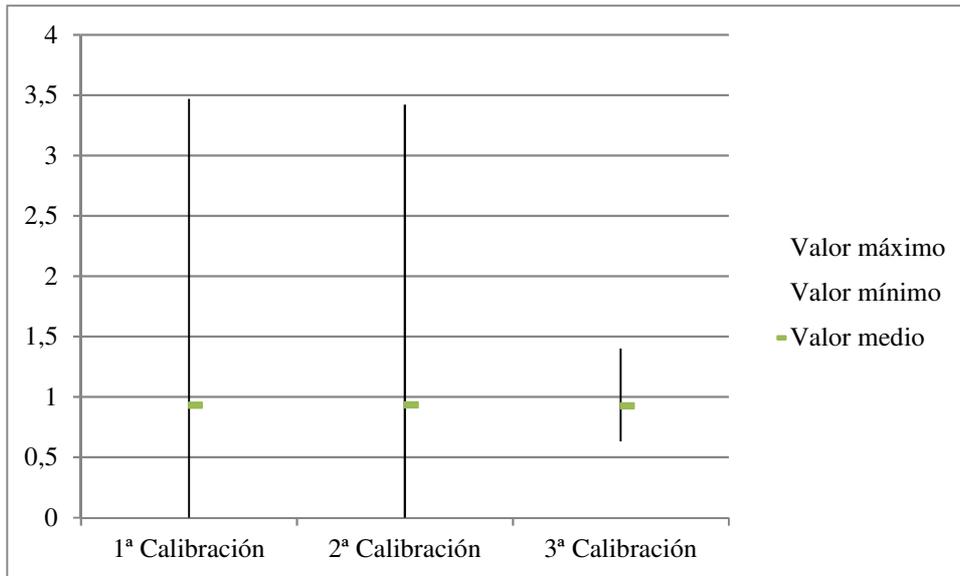


Figura 25. Gráfico de la evolución de los datos máximos, mínimos y medios de los coeficientes de calibración de cada uno de los pluviómetros.

Una vez revisados y calibrados por última vez todos los pluviómetros, el banco queda listo para la realización de ensayos.

3.2.3.2. Realización de ensayos

La operación de ensayar aspersores lleva consigo unos pasos que serán repetitivos para cualquier jornada de trabajo. Una sesión de ensayo consistirá en un día natural y normalmente durante toda la jornada laboral (8 horas de funcionamiento) pues el tiempo está limitado por la capacidad de almacenamiento de datos del DL.

El objetivo del funcionamiento continuo sobre un día es recoger datos de diferentes regímenes de viento, desde las primeras horas del día, donde el viento es nulo o escaso, hasta valores altos en las primeras horas de la tarde. En la costa de Cádiz, es muy frecuente este patrón de vientos, que además en días de vientos de Levante se puede llegar a valores muy altos y, por lo tanto, conseguir diferentes resultados de la distribución del agua. El inicio de la jornada de ensayo comienza por instalar el aspersor con las boquillas que se va ensayar. A continuación, se toma lectura de los dos caudalímetros puestos en serie, que será también la lectura final del día anterior. Después se acciona la bomba en el interruptor de torre de adquisición de datos e inmediatamente se ajusta la presión de trabajo en el regulador de presión.

Transcurrido el día se procede a la finalización del ensayo. Simplemente, se trataría de desconectar el interruptor de la bomba y descargar los datos del DL. Para ello se conecta el cable RS-232 a la torre de adquisición de datos y a través de software "LoggerNet 4.4" se descarga todos los datos y se borran de la memoria del DL para dejarlo vacío para el siguiente ensayo.

3.2.3.3. Mantenimiento

Después de realizar la calibración inicial y al estar el banco en el exterior, es necesario realizar tareas de mantenimiento obligatorias. Como ya se ha visto, las anomalías detectadas al inicio justifican tareas de mantenimiento, motivado fundamentalmente por:

- Formación de lodo en el recipiente del pluviómetro automático. Este es producido por las heces de los caracoles que invaden la rejilla de los pluviómetros (figura 26), combinado con la tierra que arrastra el viento.
- Obstrucción de los pluviómetros producidos por fauna espontánea como caracoles.
- Contactos eléctricos deficientes.



Figura 26. Imagen de la obstrucción de los pluviómetros.

Por lo tanto, el plan de mantenimiento consistió en dos tareas fundamentales: la limpieza de los pluviómetros y su posterior calibración. El criterio para activar la tarea de mantenimiento es que se cumpla cualquiera de las dos condiciones siguientes:

- Que pase más de 4 días sin realizar un ensayo.
- Que exista una variación de la climatología en condiciones de viento o lluvia fuerte.

Las tareas de mantenimiento son las siguientes:

1. Limpieza de pluviómetros: se retiran todos los colectores, se destapan los pluviómetros y se lavan con una manguera a presión. Una vez limpios se vuelven a tapar los pluviómetros y colocar los colectores.
2. Evitar fauna de caracoles: se realiza periódicamente aplicando un helicida para mantener limpia toda la zona de pluviómetros. Esta tarea se realiza cuando se detecta presencia de caracoles.
3. Evitar malas hierbas: cuando la vegetación espontánea supera la altura de 10 cm, se aplica herbicida de contacto y sistémico de amplio espectro.

3.2.4. Obtención de los datos y procesamiento de la información obtenida

Para definir la adquisición de datos, es necesario describir los datos que son guardados en el DL y el formato en el que se guardan. Posteriormente se procesa la información recogida y se indica la metodología hasta llegar a todos los datos de uniformidad de riego. El proceso global requiere de una serie de pasos, pero una vez que es estandarizado, la tarea de evaluar aspersores es cómoda y eficiente.

De los datos que se recopilan se extrajeron conjuntos de datos de periodos de 60 minutos, de los que cada uno tenían condiciones de viento específicas asociadas. Estas condiciones en cada conjunto serán analizadas y validadas. Los conjuntos de datos son múltiples pues en cada minuto comienza un conjunto de datos siendo comunes muchos de los datos de cada conjunto. El resultado de cada jornada de ensayo es una enorme cantidad de ensayos de una hora, donde cada uno de ellos fue analizado en cuanto a la estabilidad de velocidad y dirección de viento para utilizar aquellos que cumplieran unos requisitos mínimos de estabilidad en estos parámetros. Por tanto, cada ensayo es el resultado de distribución matricial del agua de un aspersor aislado con unas condiciones de velocidad y dirección de viento específicas. Todos aquellos ensayos con una alta variabilidad de uno de estos dos parámetros fueron desechados.

3.2.4.1. Obtención de los datos

Una vez terminada la jornada de ensayo se procedió a la obtención de los datos que se almacenaron en el DL desde el ordenador mediante el cable tipo “RS-232” que permite un flujo rápido de información. Es necesario que el ordenador utilice otro programa que reconozca el DL y extraiga la información que éste le suministra (“LoggerNet 4.4”).

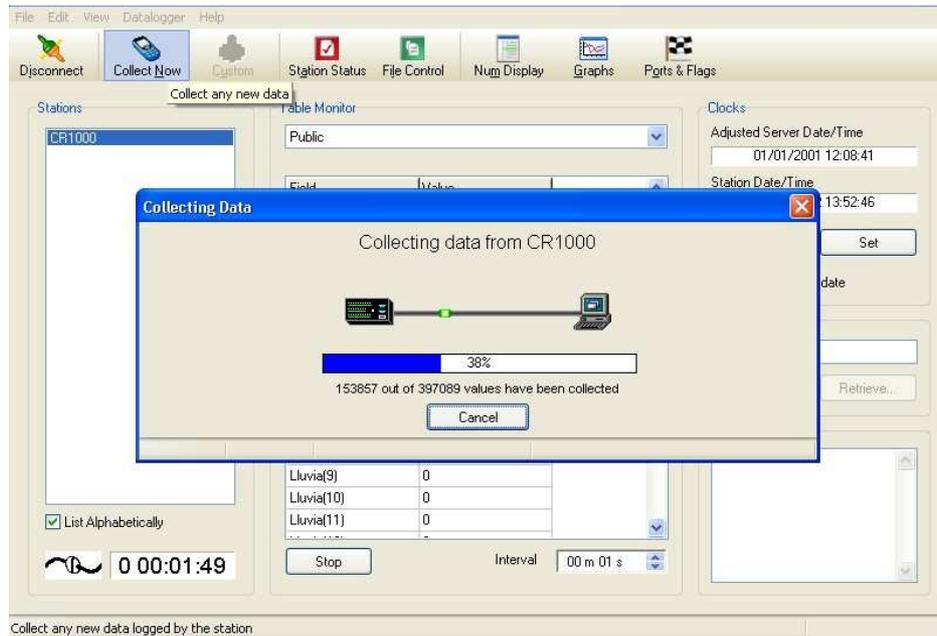


Figura 27. Captura de pantalla del ordenador del proceso de recolección de datos.

Una vez se descargan todos los datos, se tiene la información necesaria para extraer información de distribución de agua de un aspersor y sus condiciones de viento asociadas.

Los diferentes tipos de datos que obtiene el DL, tanto de los pluviómetros como de la anemoveleta, son interpretados por el programa integrado en él y los organiza en dos archivos de formato de texto de valores separados por comas (.csv), los cuales se abren con la hoja de cálculo Excel para que queden organizados en filas y columnas. Uno de los archivos obtenidos corresponde a la distribución del agua en el espacio de cada instante en los que los pluviómetros emiten señal (tabla 3). El otro archivo (tabla 4) contiene los datos de dirección y velocidad de viento cada 10 segundos como valor medio de este periodo.

Los datos de pluviometría recogidos y transformados a archivo tipo “.xlsx” reflejan la fecha y hora de cada pulso dado por cada uno de los pluviómetros conectados (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de datos de registrados por cada pluviómetro y obtenidos desde SAD.

TIMESTAMP	RECORD	Lluvia_Tot(1)	Lluvia_Tot(2)	Lluvia_Tot(3)	Lluvia_Tot(4)	Lluvia_Tot(5)
TS	RN	mm	mm	mm	mm	mm
		Tot	Tot	Tot	Tot	Tot
05/02/2015 11:00	393	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	394	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	395	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	396	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	397	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	398	0	0	0.144	0	0
05/02/2015 11:00	399	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	400	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	401	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	402	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	403	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:00	404	0	0.144	0	0	0
05/02/2015 11:00	405	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:01	406	0	0	0	0	0
05/02/2015 11:01	407	0	0	0	0	0.144
05/02/2015 11:01	408	0.144	0	0	0	0

Tabla 4. Matriz de datos de registrados por la anemoveleta y obtenidos desde SAD.

TIMESTAMP	RECORD	VV_media	DV_media	Desv_St_DV
TS	RN	m/s	m/s	m/s
		WVc	WVc	WVc
05/02/2015 11:24	1	1.392	116.8	12.73
05/02/2015 11:24	2	1.205	80.7	9.86
05/02/2015 11:24	3	1.499	74.54	6.79
05/02/2015 11:24	4	1.95	75.35	7.967
05/02/2015 11:24	5	2.293	80.1	4.117
05/02/2015 11:24	6	2.234	83.6	1.048
05/02/2015 11:25	7	2.009	81.7	4.386
05/02/2015 11:25	8	1.931	98.1	8.67
05/02/2015 11:25	9	1.284	106.4	5.723
05/02/2015 11:25	10	0.941	124.6	13.84
05/02/2015 11:25	11	0.598	120.3	3.271
05/02/2015 11:25	12	0.764	103.8	12.23
05/02/2015 11:26	13	1.313	78.35	17.15
05/02/2015 11:26	14	1.793	76.03	5.305
05/02/2015 11:26	15	1.764	79.43	8.01
05/02/2015 11:26	16	1.999	77.62	3.497

Una vez se tienen los datos organizados en filas y columnas en el archivo Excel es fácil obtener la cantidad total de agua recogida por cada pluviómetro en un periodo de tiempo concreto, simplemente hay que realizar el sumatorio de los datos en cada columna que corresponde a un pluviómetro en el periodo de tiempo que deseemos.

En relación al diámetro de los colectores se ha calculado la precipitación de cada pulso del balancín del pluviómetro. Por tanto, se ha configurado el DL para que cada pulso eléctrico que reciba de los pluviómetros lo interprete como 0,144 mm de agua.

Igualmente, los datos de vientos recogidos en el segundo archivo (tabla 4) también son importados a un archivo Excel donde serán organizados en columnas y filas, tanto en fecha y hora como en velocidad y dirección del viento. El objetivo de este orden será aplicar una serie de algoritmos para su validación.

Una forma distinta de obtener datos es la visualización de los mismos en tiempo real; para ello necesitamos tener conectado el ordenador durante el tiempo que se quiera visualizar los datos. Esta opción permite realizar las siguientes funciones con suma agilidad.

1. Comprobar el funcionamiento correcto de todo el banco, anemoveleta y pluviómetros.
2. Identificar los pluviómetros que se hayan observado que no funcionan previamente.
3. Calibrar el banco con el procedimiento expuesto en el apartado 4.2.3.1.

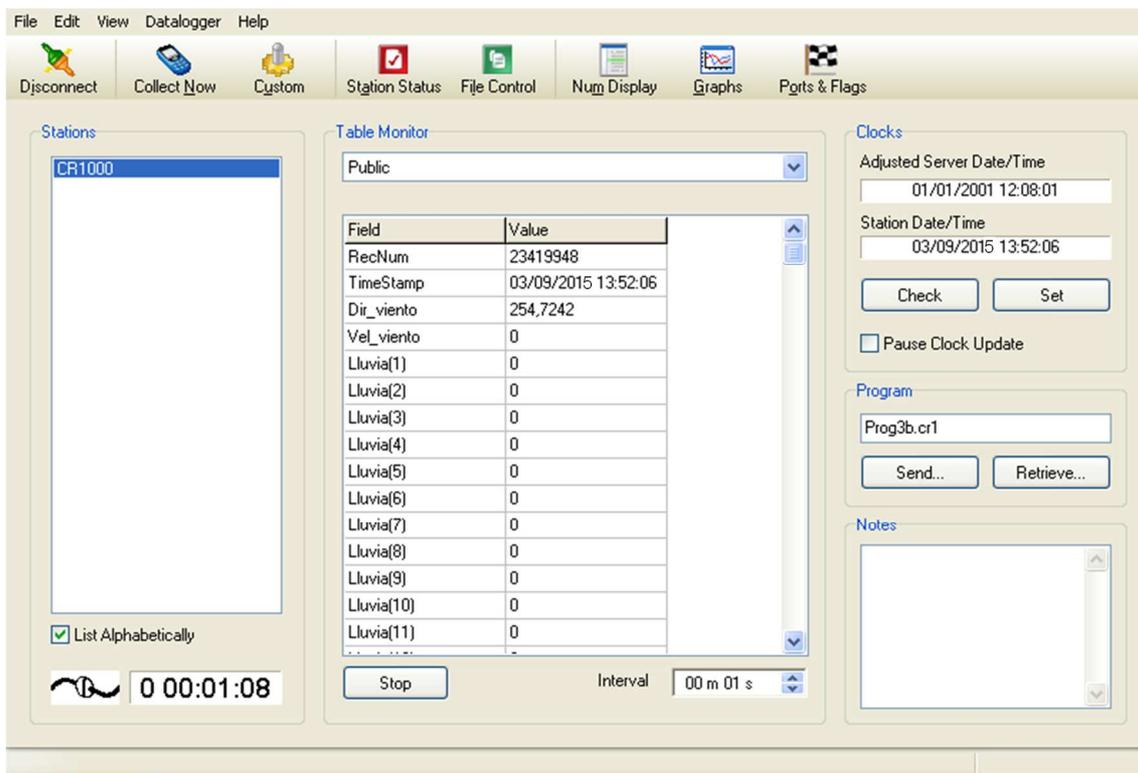


Figura 28. Captura de pantalla del ordenador del proceso de conexión en tiempo real.

3.2.4.2. Interpretación de los datos de viento

Según la norma ISO 7749-2 lo primero que tenemos que tener en cuenta para la viabilidad de los datos de viento es que la desviación típica de la dirección y la velocidad del viento durante el ensayo completo sea menor del 20%.

Las tablas siguientes (5 y 6) muestran el análisis de la desviación típica de las variables dirección y velocidad del viento. El valor que se analiza es la desviación típica

del valor reflejado en cada línea según el rango medio horario en función del análisis hacia delante, de manera que si en las dos últimas columnas aparecen tres asteriscos es válido el ensayo según de la variable que se trate. Para escoger el ensayo se coge como criterio que las dos variables tengan los tres asteriscos para el rango de una hora.

Tabla 5. Tabla de viabilidad del ensayo por dirección.

				ANÁLISIS ENSAYOS VIABLES POR DIRECCION			
				Desv. típ. (30 min)	Desv. típ. (60 min)	To (30)	To (60)
04/02/2015 11:57	25398	4.194	100.7	14.62215395	14.91001588	***	***
04/02/2015 11:57	25399	4.802	91.6	14.67350577	14.87952135	***	***
04/02/2015 11:57	25400	4.479	95.9	14.72500319	14.86722233	***	***
04/02/2015 11:57	25401	4.332	76.08	14.69751182	14.84741109	***	***
04/02/2015 11:57	25402	3.822	92.5	14.69501175	14.84655344	***	***
04/02/2015 11:57	25403	4.41	84.3	14.79900428	14.83480195	***	***
04/02/2015 11:58	25404	4.038	86	14.93804714	14.92297317	***	***
04/02/2015 11:58	25405	5.096	86.4	15.10965284	14.92350617	***	***
04/02/2015 11:58	25406	4.204	101.5	15.17551523	14.91932348	***	***
04/02/2015 11:58	25407	4.273	107.8	15.10755572	14.90873925	***	***

Tabla 6. Tabla de viabilidad del ensayo por velocidad.

				ANÁLISIS ENSAYOS VIABLES POR VELOCIDAD			
				Desv. típ. (30 min)	Desv. típ. (60 min)	To (30)	To (60)
04/02/2015 11:57	25398	4.194	100.7	0.754276968	0.744064816	***	***
04/02/2015 11:57	25399	4.802	91.6	0.752207204	0.742495411	***	***
04/02/2015 11:57	25400	4.479	95.9	0.743613433	0.73866243	***	***
04/02/2015 11:57	25401	4.332	76.08	0.73910782	0.737696275	***	***
04/02/2015 11:57	25402	3.822	92.5	0.736186219	0.73725163	***	***
04/02/2015 11:57	25403	4.41	84.3	0.734897381	0.736680947	***	***
04/02/2015 11:58	25404	4.038	86	0.730078454	0.734315995	***	***
04/02/2015 11:58	25405	5.096	86.4	0.727754537	0.733443422	***	***
04/02/2015 11:58	25406	4.204	101.5	0.718373786	0.729453673	***	***
04/02/2015 11:58	25407	4.273	107.8	0.71901974	0.727775703	***	***

Una vez se consigue una hora de ensayo que cumple que la desviación típica de la dirección y la velocidad del viento durante el ensayo completo sea menor de 20%, se puede comenzar a tratar los demás datos.

La automatización del banco de aspersores nos permite, en el caso de que no se obtenga una hora de ensayo durante la que se cumpla esta premisa, se podría escoger fragmentos durante la experiencia que cumplan esta condición. Por ejemplo, se podría obtener una hora de ensayo agrupando cuatro partes de 15 minutos, que no se solapen en

el tiempo entre sí y que cumplan en conjunto la condición de una desviación menor al 20% en las dos variables.

El siguiente paso, una vez escogida cualquier hora que cumplen ambas condiciones, es categorizar el tipo de viento (velocidad y dirección medias) de esa hora. Para determinar estos dos factores de una forma óptima, se trata cada registro de los datos anemométricos (velocidad y dirección medias de 10 segundos). Cada registro es un vector con dos componentes: dirección y velocidad del viento. Para obtener el vector promedio de dirección y velocidad de viento se utiliza en la hoja de cálculo con operaciones en términos de números imaginarios. Cada vector es un número con dos componentes: componente vertical y horizontal, que en el caso que nos ocupa la parte real y parte imaginaria respectivamente. Por tanto, el promedio de estos números imaginarios es un vector que caracteriza el vector de viento promedio. En la tabla 7 se muestra un ejemplo de las operaciones realizadas en las hojas de cálculo para obtener estas medias vectoriales, así como la obtención final de la velocidad del viento en m/s y la dirección de éste en grados sexagesimales.

Tabla 7. Resumen de las operaciones realizadas para obtener las medidas vectoriales.

Velocidad	Dirección	Dirección(rad)	Parte real	Parte imaginaria	Número complejo	Sumatorio(S)
1.98	112.9	1.970476726	-0.77046542	1.823947103	-0.770465421277608+1.82394710302013i	-280.11011378393+479.144191001858i
1.617	113.9	1.987930018	-0.65511395	1.478348646	-0.655113945823038+1.4783486456138i	
1.891	120	2.094395102	-0.9455	1.637654039	-0.9455+1.63765403855637i	Medidas totales(N)
1.48	123.6	2.157226955	-0.81901949	1.232723436	-0.819019492880149+1.23272343625095i	360,00
1.274	116.1	2.026327262	-0.5604825	1.144087132	-0.560482502396436+1.14408713151902i	
0.872	124.9	2.179916236	-0.4989112	0.715172436	-0.49891120164449+0.715172435761929i	Media total (S/N)
1.539	138.5	2.417281014	-1.15264285	1.019772254	-1.15264285429427+1.01977225420402i	-0.765328179737514+1.30913713388486i
1.588	130.1	2.270673357	-1.02286832	1.214695185	-1.02286832406108+1.21469518465847i	
1.548	121.5	2.120575041	-0.80882778	1.319886974	-0.808827778180289+1.31988697442013i	Dirección media en radianes
1.254	116.4	2.031563249	-0.55757251	1.123222547	-0.557572514697899+1.12322254734022i	2.099819096
1.627	120.2	2.097885761	-0.81841345	1.406175103	-0.818413453167392+1.40617510277868i	
1.617	132.6	2.314306588	-1.09450844	1.19026899	-1.09450844297686+1.19026898987261i	
1.294	133	2.321287905	-0.88250588	0.94637169	-0.882505877920873+0.946371689895207i	Resultado final
1.196	115.6	2.017600615	-0.51677456	1.078591702	-0.516774555567171+1.07859170158052i	Velocidad media (m/s)
1.686	107.8	1.881464934	-0.51540228	1.605290156	-0.515402284167796+1.60529015616325i	1.516432411
1.46	134.8	2.352703832	-1.02876595	1.035973275	-1.02876594654685+1.03597327534332i	Dirección media (°)
1.411	116.7	2.036799237	-0.63398911	1.260547029	-0.63398910704703+1.26054702893058i	120.3107719

3.2.4.3. Interpretación de los datos pluviométricos

Para referenciar la posición de cada uno de los pluviómetros se enumeran los pluviómetros según la tabla 8 para su posterior identificación en la matriz de datos del software.

Tabla 8. Identificación de los pluviómetros en el Modelo de rejilla de datos obtenida en la hoja de cálculo.

							44	88								
				43	42	41	40	84	85	86	87					
			39	38	37	36	35	79	80	81	82	83				
		34	33	32	31	30	29	73	74	75	76	77	78			
		28	27	26	25	24	23	67	68	69	70	71	72			
	22	21	20	19	18	17	16	60	61	62	63	64	65	66		
	15	14	13	12	11	10	9	53	54	55	56	57	58	59		
8	7	6	5	4	3	2	1	45	46	47	48	49	50	51	52	
140	139	138	137	136	135	134	133	89	90	91	92	93	94	95	96	
	147	146	145	144	143	142	141	97	98	99	100	101	102	103		
	154	153	152	151	150	149	148	104	105	106	107	108	109	110		
		160	159	158	157	156	155	111	112	113	114	115	116			
		166	165	164	163	162	161	117	118	119	120	121	122			
			171	170	169	168	167	123	124	125	126	127				
				175	174	173	172	128	129	130	131					
							176	132								

3.2.4.4. Solapamiento de aspersores en condiciones de riego

Una vez que se ha obtenido la nube de puntos de la cantidad recolectada por cada pluviómetro en el intervalo de tiempo escogido (tabla 9) y el análisis del viento durante el ensayo con el resultado de un vector que define su carácter de velocidad y dirección de viento, se archivan los datos para el siguiente paso. Previamente, se caracteriza el ensayo según el programa de solapamiento de aspersores para marcos de aspersores y dirección de viento Space Pro, teniendo en cuenta variables como: tipo de unidades métricas, porcentaje para el cálculo del coeficiente de programación y otras características de diseño.

El resultado es una matriz de datos con el orden anterior y en las unidades exigidas en el programa de solapamiento. Para ello en un archivo se recoge la pluviometría de cada ensayo y en la posición según la matriz anterior y con todos los parámetros del ensayo requeridos por el programa de solapamiento tal y como se muestra en la figura 29. Entre

los datos requeridos están: nombre del aspersor, modelo del aspersor, boquilla, presión, caudal, giro, duración del ensayo, fecha, número de filas y de columnas, espacio entre las filas y las columnas, altura del aspersor, tiempo de giro del aspersor, número de aspersores y la hora del inicio del ensayo.

The screenshot shows a 'Command' dialog box with the following fields and values:

Sprinkler Name	UNIRAIN		
Sprinkler Model	F46		
Nozzle	11/64 Sin VP		
Pressure (kpa)	300	Riser Height (cm)	130
Flow Rate (lpm)	20.37	Minutes/rev. (Min.)	0.43
Arc (Degrees)	360	Set Screw Setting	
Test Duration (Min.)	60	Record Number	176
Test Date (mm/dd/yy)	04/16/13	Test Time (hh:mm)	12:36
Comment			
Number of Rows	16		
Number of Columns	16		
Catchment Spacing	2		

A 'Continue...' button is located at the bottom right of the dialog box.

Figura 29. Pantalla para la definición del ensayo.

El programa Space Pro tiene muchas funciones diferentes; para nuestro estudio en concreto utilizaremos la función “Full Grids” la cual nos permitirá a partir de la nube de puntos de la pluviometría, reproducir el riego en el marco deseado para obtener la uniformidad de riego de una instalación completa.

Además, el programa permite con los valores de presión y velocidad del viento ensayado, la posibilidad de definir la dirección del viento en relación a la dirección del ramal del riego.

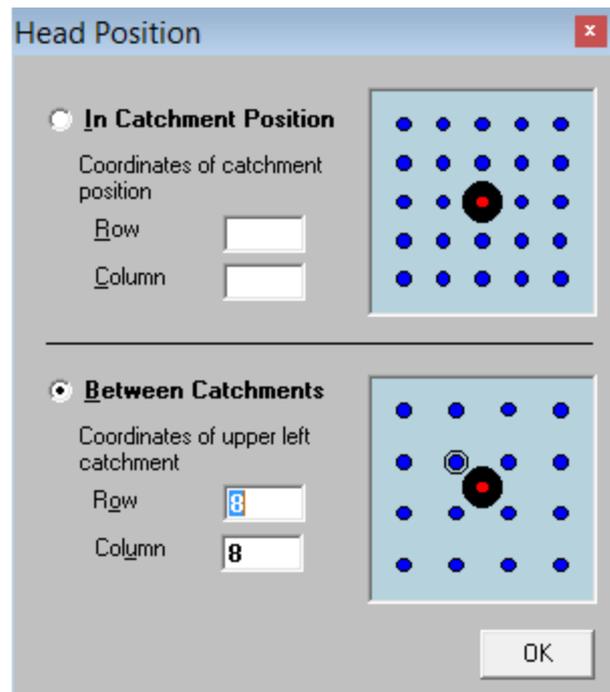


Figura 30. Posición del aspersor respecto a los pluviómetros.

El siguiente dato a introducir en el programa es la posición del aspersor respecto al número de filas y columnas de los pluviómetros; en nuestro caso en particular tenemos 16 filas y 16 columnas por lo que el aspersor estará en medio de la fila 8 y la columna 8 (figura 30).

Para finalizar el proceso de introducción de datos en la función "Full Grids" solo nos queda introducir la nube de puntos de la cantidad de agua total recolectada por cada pluviómetro. Para incluir los datos de este apartado de forma rápida, el programa permite la herramienta de edición "Pegar" para trasladar una rejilla completa de datos de un solo movimiento.

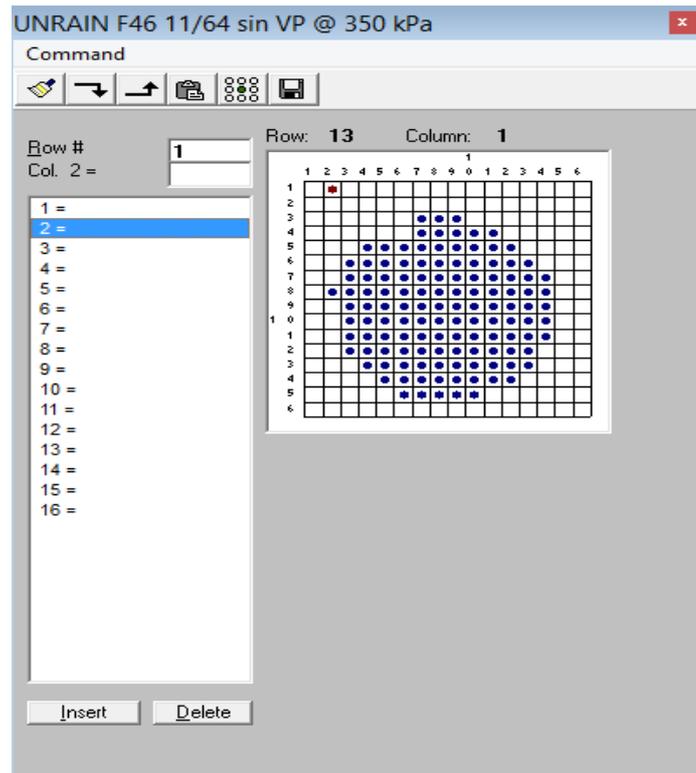


Figura 31. Pantalla para la introducción de la rejilla de datos.

Esta rejilla de datos corresponde a un marco determinado por el número de filas, número de columnas, el espaciamiento entre colectores del banco y el número total de registros. En el caso particular de este estudio, el número total de filas y columnas es 16 y 16, lo que resulta una rejilla con 256 espacios. De estos, únicamente 176 de ellos registran datos por la limitación a un radio mojado de 15 metros.

Por último tenemos la opción de guardar todos los datos, generándose un archivo formato “.grid” donde se muestra un resumen de los datos del ensayo y una representación gráfica de la lluvia del aspersor (figura 32). Este archivo podremos utilizarlo para posteriores ediciones y simulaciones, permitiendo el programa a partir de aquí comenzar solapamiento de aspersores de riego y otras funciones.

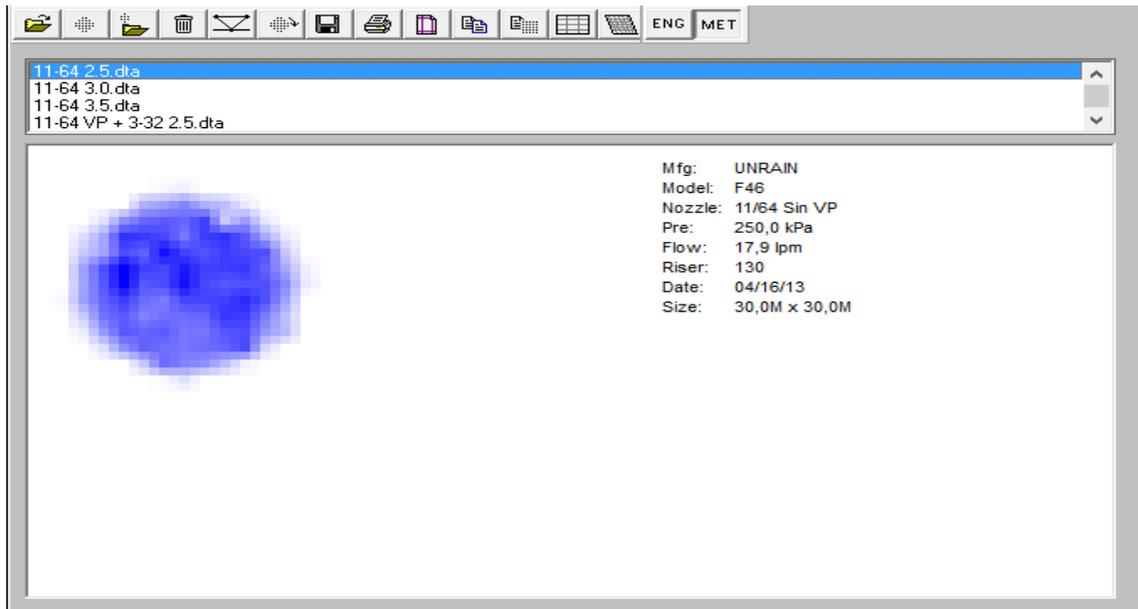


Figura 32. Pantalla del archivo “.grid” obtenido.

En cada uno de estos archivos estudiamos cómo varía y se comporta el coeficiente de uniformidad respecto a la dirección del viento, a diferentes tipos y dimensiones de marcos.

A continuación, se explica las dos funciones principales del Space Pro para poder realizar el estudio antes mencionado.

1. Reproducción de la orientación de los datos de la rejilla.

En el menú previo a la obtención de resultados del solapamiento, existe una opción que permite girar la rejilla de datos respecto al punto donde se encuentra el aspersor determinado anteriormente (Figura 33). Esta función es la que se va a usar para modificar la posición relativa de las líneas de cultivo respecto a la dirección de ataque del viento.

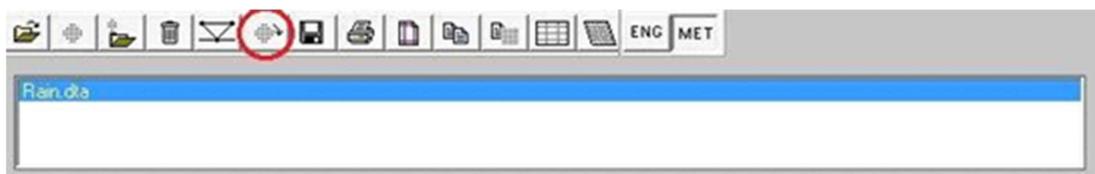


Figura 33. Pantalla donde se muestra el icono de la función para modificar la orientación de los datos en la rejilla.

La función permite el giro de un número entero de grados sexagesimales y en cualquier dirección tomando como eje de rotación la posición del aspersor determinada (Figura 34).

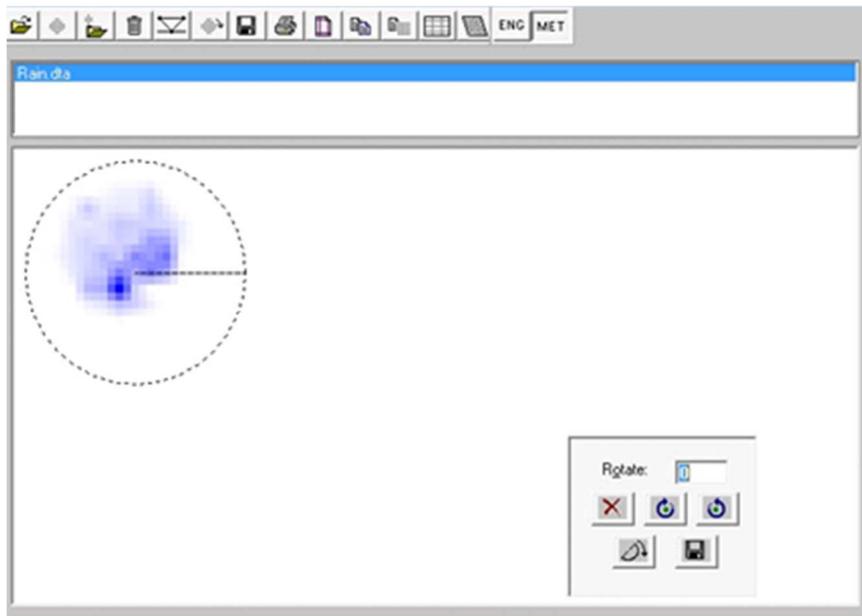


Figura 34. Pantalla de la función para modificar la orientación de los datos

La media vectorial del viento durante el período de ensayo informa sobre la dirección media del viento que será la que se utilizará como característica y de la cual obtendremos los primeros resultados de uniformidad dependiendo del tipo de marco. Para obtener las nuevas nubes de puntos a partir de las posiciones relativa de las líneas de cultivo respecto a la dirección de ataque del viento (paralelo (0°), oblicuo (45°) y perpendicular (90°)), habrá que realizar una serie de pasos que explicamos a continuación.

Para viento paralelo a las líneas de cultivo solo habrá que introducir el ángulo inicial del ensayo, girarlo y darle a guardar, obteniendo así un archivo de tipo “.grid” con la nueva nube de puntos.

Para la obtención de las nuevas nubes de puntos para una dirección del ataque del viento oblicuo y perpendicular partiremos del archivo generado para viento paralelo, en el cual introducimos 45° , se gira y se guarda, obteniendo así un nuevo archivo para una dirección de ataque del viento oblicuo. De igual forma se hace para una dirección de ataque del viento perpendicular, solo que introduciendo 90° .

2. Simulación de marcos de diseño de la instalación.

Con esta opción el programa permite la simulación de una situación de riego reproduciendo la lluvia del aspersor ensayado dentro de la superficie del marco de aspersión indicado por el usuario. De esta forma se podrá elegir entre un marco rectangular o triangular, así como la separación entre aspersores (figura 35).

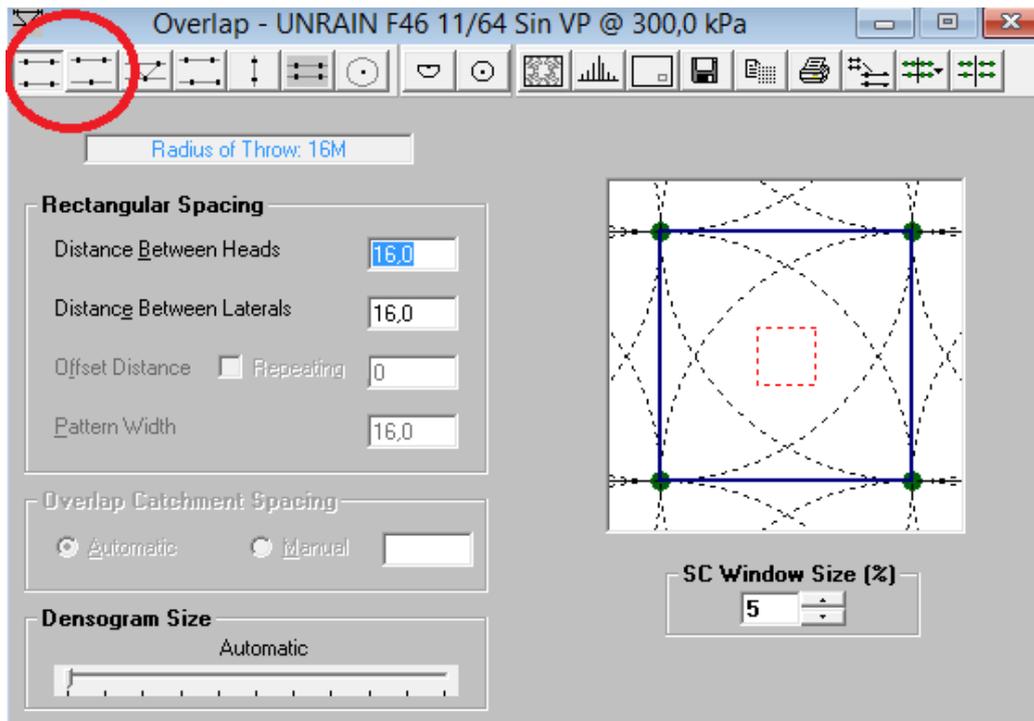


Figura 35. Pantalla de la función para modificar el tipo de marco.

El programa dispone de una herramienta de realización de múltiples solapamientos en un mismo cuadro de diálogo, como se puede apreciar en la figura 36. De esta forma para unas mismas condiciones de presión, velocidad y dirección de viento, se pueden simular rangos de marcos de riego con, como por ejemplo, un límite inferior (10x10) hasta un límite superior (18x18) como se muestra en la figura siguiente. En esta línea también permite la opción de realizarse en distintas disposiciones de marcos (rectangular, triangular e incluso definido por el usuario) y se repetirán los mismos parámetros para cada una de las disposiciones requeridas. Además, es definible el incremento de distancia entre los distintos marcos simulados, con objeto de obtener mayor o menor número de resultados.

Los valores obtenidos son exportables a formato de hoja de cálculo y pueden ser gestionados finalmente para una base de datos de resultados.

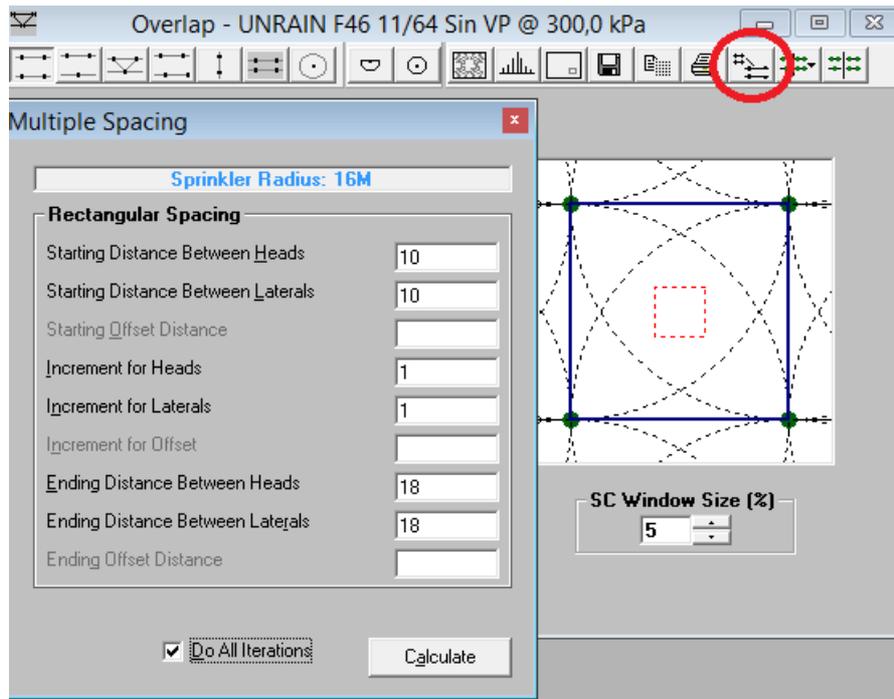


Figura 36. Pantalla de la función para modificar la distancia entre aspersores.

El resultado final de cada uno de los escenarios es una tabla donde se muestra los valores de los siguientes parámetros:

- Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU)
- Uniformidad de Distribución (UD)
- Coeficiente de Programación (SC, Scheduling Coefficient) sobre el 5% de la superficie
- Pluviosidad mínima, media, teórica y máxima en mm/h del área de riego.

Tabla 9. Tabla de resultados del ensayo para cada velocidad y dirección de viento.

Spacing	CU [%]	DU [%]	SC (5%)	Min [mm/h]	Mean [mm/h]	Theor. [mm/h]	Max [mm/h]
10,0 x 10,0							
11,0 x 10,0							
...
17,0 x 18,0							
18,0 x 18,0							

De este resultado básico con 81 valores de uniformidad, exclusivo para cada presión y velocidad de viento se reproducen estos datos en dos disposiciones de aspersores (triangular y rectangular) y con tres orientaciones de viento (paralelo, perpendicular y oblicuo al ramal de riego). Obteniéndose para cada aspersor y boquilla y

para una presión concreta en un rango temporal (dónde el viento no varía) 486 valores de uniformidad. A partir del dato principal de UD se obtienen otros datos indirectos señalados en el apartado 3.2.5.1

3.2.5. Ensayos

De los objetivos planteados, el cuarto es la explotación del banco con ensayos de aspersores a demanda del sector y estudio de los datos. Esta primera explotación se materializa en un convenio de colaboración entre el Instituto de Investigación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA) y la Asociación de Investigación para la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (AIMCRA) para el estudio de uniformidad de riego de aspersores y boquillas más frecuentes en este sector remolachero en Andalucía con el banco de ensayo.

El objetivo era clasificar las distintas combinaciones de aspersores con viento en función de la uniformidad de riego, para mejorar los diseños de riego por aspersión en remolacha azucarera y plantear la viabilidad de riegos con presiones más bajas a las convencionales (Salvatierra et al., 2016). Con el propósito de conseguir un ahorro energético se planteó esta línea de ensayos a baja presión. Es necesario en el escenario existente de riego a presión y la subida creciente del coste de la energía eléctrica, plantear una trayectoria de una transición hacia la baja presión en el riego presurizado. Probablemente y con buenos resultados comenzará por las instalaciones de redes instalaciones individuales y podrá continuar en un futuro cercano para instalaciones de redes colectivas de riego. El cultivo de la remolacha azucarera en España y en otros países mediterráneos va íntimamente unido al riego por aspersión, por lo que bajar los requerimientos de presión supondría bajar los costes energéticos del riego y por tanto, los costes de cultivo. Este esquema de innovación generaría resultados para los demás cultivos que utilizaran el riego por aspersión.

Para el estudio se han ensayado todos aquellos aspersores convencionales utilizados habitualmente en el cultivo de la remolacha azucarera. Estos aspersores son los más usados en España, debido a que este cultivo está implantado en las zonas más representativas de cultivos herbáceos extensivos. Se trata de un amplio trabajo donde se tienen en cuenta las condiciones reales de funcionamiento con viento. Se han incluido la mayoría de los fabricantes y contemplado todas las situaciones de riego posibles para analizar las respuestas en condiciones de bajas presiones. En fases posteriores y para ofrecer resultados concretos, se contará con la participación de empresas del sector interesadas en conocer el comportamiento de sus productos en condiciones dónde se optimice el consumo energético.

Para la realización del trabajo se ha utilizado además un banco de ensayo radial convencional de aspersores para ensayos sin viento dónde, de manera rápida y simultánea, se obtuvieran más datos del comportamiento de los aspersores ensayados en condiciones sin viento (Salvatierra et al, 2015a y Salvatierra et al., 2015b). Con ello se analizó la influencia del viento con respecto a condiciones reales.

Para la ejecución de los ensayos se fijaron tres valores de presión objetivo en los ensayos con viento. Las presiones perseguidas fueron: 350, 250, y 200 kPa. Para el banco manual de aspersores sin viento: 350, 250, 200, y 150 kPa.

Para el banco de ensayos automático de aspersores con viento se obtuvieron 29.160 resultados de UD y para el banco manual de aspersores sin viento 21.384 resultados de UD. En total suponen 50.544 resultados de UD del material ensayado. Este número de resultados viene en relación a las variables contempladas en la tabla 10.

En la estrategia seguida para elaborar un índice de ensayos se han contemplado 8 variables principales. En la tabla siguiente se resumen las variables y el número de valores para cada variable.

Tabla 10. Número de variables principales contempladas para los resultados conseguidos.

	fabricantes	Modelos/ fabricante	Combinaciones de boquillas/ modelo	Presiones de funcionamiento	Velocidades de viento/presión *	Direcciones del viento/velocidad/ velocidad	Marcos de riego/ caso	Disposición/ marco
Banco automático de aspersores con viento	5	2	3	3	2	3	81	2
Banco manual de aspersores sin viento	1	2	5	4	1	0	81	2

* Velocidades aproximadas dependiendo de las circunstancias ensayadas

Las tres primeras variables (fabricante, modelo de aspersor y combinación de boquilla) responden a los aspersores más comunes utilizados en España. Los siguientes (presión, velocidad del viento y dirección del viento y disposición) corresponden a los siguientes valores:

- Presiones ensayadas: 200, 250 y 350 kPa.
- Velocidades del viento: preferiblemente, se procesaron 2 valores para cada modelo de aspersor, uno con viento leve (menos de 2 m/s) y el otro con viento moderado (entre 2 y 4 m/s).
- Indicaciones del viento: paralelo, oblicuo y perpendicular con respecto al lateral, clasificando los resultados infinitos que podrían obtenerse en esos tres.
- Los marcos estudiados corresponden a todas las combinaciones que van desde 10x10 m hasta 18x18 m en todas las configuraciones posibles con un intervalo de 1 m entre cada variación de diseño.
- Las dos disposiciones estudiadas son rectangulares y triangulares.

Los datos obtenidos para un aspersor aislado pueden usarse para simular múltiples escenarios, calculando la uniformidad de riego para diferentes diseños.

En el anexo II, se inventarían los diferentes conjuntos de aspersores y boquillas que se han estudiado, todo ello teniendo en cuenta la disposición real utilizada en campo.

Por un lado, en el apartado AII.1 están los casos más frecuentes y de mayor interés para el sector en condiciones reales de funcionamiento (con viento).

Y por otro, en el apartado AII.2, y de manera complementaria se relacionan casos de aspersores en condiciones sin viento con el objetivo de disponer de resultados de la influencia del viento en las distintas condiciones de funcionamiento de un aspersor. El método de ensayo utilizado es el indicado como Modelo Radial (Vories y Von Bernuth, 1986) según la norma ISO STANDARD 7749/2 (1990), y se realizaron en el banco de ensayo manual y dentro de una nave cerrada para evitar la cualquier acción del viento.

A continuación se define la metodología de tratamiento de los datos.

3.2.5.1. Resultados de los ensayos en el banco

Una vez que se obtienen los resultados de uniformidad de riego de cada situación, se crea una base de datos dónde además de los datos obtenidos se añaden dos variables indirectas más, como son:

- Índice de grosor de gota. Keller y Bliesner (1990) propusieron la siguiente fórmula:

$$IG = 0,032 \frac{p^{1,3}}{B} \quad ec. 3.1$$

Dónde:

p: es la presión de trabajo en kg/cm² en el aspersor.

B: es el diámetro de la boquilla en mm.

Es recomendable que el índice se sitúe en valores entre 7 y 17. Valores menores que 7 indican gotas demasiado gruesas, y valores mayores que 17 indican gotas demasiado finas. La distribución del agua puede verse afectada negativamente con tamaños de gota extremos. Sólo se justifican valores de IG menores de 7 en condiciones de vientos fuertes (más de 4,5 m/s).

- Pérdidas por evaporación y arrastre. Dónde se determina la proporción efectiva del agua descargada por el aspersor que no llega al suelo. Este índice fue propuesto también por Keller y Bliesner (1990), a través de la siguiente fórmula:

$$Pe = 0,976 + 0,005 \cdot ETP - 0,00017 \cdot ETP^2 + 0,0012 \cdot V - IG \cdot (0,00043 \cdot ETP + 0,00018 \cdot V + 0,00016 \cdot ETP \cdot V)$$

ec. 3.2

Dónde:

ETP: Evapotranspiración potencial (en mm/día), es la presión de trabajo en kg/cm² en el aspersor. El valor incorporado ha sido un valor medio de estación agroclimática del IFAPA de Chipiona de 7,56.

V: Velocidad del viento en km/h

IG: Índice de grosor de gota.

Todos los resultados han sido clasificados para disponer de una herramienta potente de análisis y por tanto, generar resultados como los que a continuación se exponen (figura 37).

Ensayo de aspersor y simulación

Id ensayo: 1

Fabricante aspersor: Unirain

Modelo de aspersor: F 46

Boquilla princ: 1/8

Boquilla secun:

Diametro: 3,175

Accesorio: Vaina prolongadora blanca

Presion: 3,5

Caudal: 723,84

Indice de grosor de gota: 20,6

Indice de grosor de gota efectivo: 17,00

Velocidad del viento: 3,68

Rango de velocidad: Fuerte

ETP: 7,569

Perdidas por evaporacion y arrastre: 34,86

Id en	Marco	Disposición d	Dirección	Distancias entre aspersores	Distancia entre ramales	Lámina	UD
285	18.0 x 13.0	TRIANGULAR	PARALELO	18	13	3,09	58,00%
286	10.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	10	14	5,17	64,00%
287	11.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	11	14	4,70	61,00%
288	12.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	12	14	4,31	61,00%
289	13.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	13	14	3,98	62,00%
290	14.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	14	14	3,69	63,00%
291	15.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	15	14	3,45	64,00%
292	16.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	16	14	3,23	63,00%
293	17.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	17	14	3,04	60,00%
294	18.0 x 14.0	TRIANGULAR	PARALELO	18	14	2,87	55,00%
295	10.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	10	15	4,83	59,00%
296	11.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	11	15	4,39	57,00%
297	12.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	12	15	4,02	57,00%
298	13.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	13	15	3,71	58,00%
299	14.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	14	15	3,45	59,00%
300	15.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	15	15	3,22	59,00%
301	16.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	16	15	3,02	58,00%
302	17.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	17	15	2,84	55,00%
303	18.0 x 15.0	TRIANGULAR	PARALELO	18	15	2,68	49,00%

Registros: 1 de 104

Figura 37. Muestra la base de datos creado a través del formulario combinado de un ejemplo de ensayo de aspersor y una muestra de combinaciones.

3.2.5.2. Análisis y estudio de conjunto de resultados

Disponer de toda la información clasificada en una base de datos como la que aquí se expone permitirá todo tipo de consultas con diferentes criterios para el desarrollo de cualquier estudio o propósitos.

Uno de estos propósitos es el análisis de conjuntos de resultados con una perspectiva de análisis grupal de aspersores o grupo de situaciones, con una estrategia anterior marcada. Para este tipo de análisis, se ha utilizado el modelo de regresión lineal múltiple, que relacionará la UD (variable dependiente) con las otras variables de prueba que influyen en la uniformidad (variables independientes). Esta metodología permitirá evaluar la influencia de cada variable independiente para cada conjunto de aspersores o situaciones. Estos grupos se pueden definir en relación con un objetivo específico. En el estudio que se va a tratar, los grupos se han definido de acuerdo con la arquitectura del aspersor. Para esto, el conjunto de aspersores se ha dividido en las siguientes categorías:

- Conjunto 1: aspersores de impacto convencionales con boquillas hexagonales.
- Conjunto 2: aspersores de impacto no convencional con boquillas de bayoneta
- Conjunto 3: aspersores rotativos.

3.2.5.3. Metodología de análisis de los resultados orientados al riego en baja presión

Actualmente el coste energético de los riegos en las explotaciones agrícolas representa un alto porcentaje de los costes de producción, y por tanto, es uno de los factores prioritarios que se debe reducir para mejorar la competitividad y rentabilidad de la actividad agrícola de regadío. Con esta metodología, previamente al proyecto TRANSICIÓN COLECTIVA AL RIEGO DE BAJA PRESIÓN, se pretende analizar la viabilidad de trabajar con presiones más bajas a las convencionales para poder contribuir al ahorro energético en el riego por aspersión.

Como estudio previo a las evaluaciones en campo en condiciones reales que se abordan en este estudio, el IFAPA junto con AIMCRA realizó un estudio completo del comportamiento de los aspersores más representativos del mercado, donde obtuvieron configuraciones de riego que permitían un riego de calidad en condiciones de baja presión.

Del total de ensayos al inicio de este apartado se planteó un estudio sobre la viabilidad del riego por aspersión para regar en condiciones de baja presión. Disponiendo de ensayos en condiciones de presiones bajas y a presiones convencionales, y todos ellos bien clasificados e informatizados en una base de datos, se define la siguiente metodología de estudio. Para este caso se plantean las siguientes hipótesis de trabajo:

1. Seleccionar configuraciones de instalaciones en las que podría ser viable regar con presiones más bajas.
2. Hacer un análisis de conjunto con la variable exclusiva de la UD.
3. Analizar sobre el análisis de conjunto la influencia de la variable viento comparando la presión convencional con la baja presión.

Para proceder se plantean determinadas consultas sobre la base de datos de resultados que atenderán a situaciones frecuentes en el sector y otras orientadas seleccionando resultados aceptables de UD en condiciones de baja presión, siempre sin excesivas modificaciones en las instalaciones ya existentes. El objetivo además de evaluar la viabilidad de la baja presión es enfocar un escenario de transición a la baja presión con un horizonte a medio plazo.

3.2.6 Evaluaciones complementarias.

Una de las líneas finalistas circunscrita en el principal inconveniente del riego por aspersión, es el ahorro energético en el bombeo. Para este problema es fundamental innovar en el funcionamiento a presiones por debajo de las que se han estado utilizando hasta el momento. Sobre este tema se ha incluido estudios del uso de los resultados que se obtienen desde el banco de ensayos. Estos estudios pretenden, una vez seleccionados los mejores resultados de aspersores en el banco, testarlos en campo para disponer de un periodo de demostración y uso. A continuación, se desarrolla la línea metodológica para un estudio de la calidad del riego de aspersores funcionando a baja presión. Para ello se aborda lo siguiente:

1. Evaluaciones múltiples simultáneas en campo.
2. Evaluaciones sobre toda una campaña de riego sobre un cultivo.

3.2.6.1. Evaluaciones múltiples simultáneas en campo

Para el primer caso, y para el desarrollo de las pruebas de campo se ha contado con dos parcelas cercanas en una zona regable y sobre cultivo de alfalfa recién cortada. Sendas parcelas disponen de diseños de riego por aspersión idénticos y con ramales orientados en la misma dirección. Las condiciones de presión en ambas se aseguran a través de dos pilotos de regulación de presión en la entrada de la tubería secundaria de la parcela y mediante el control de la presión en los aspersores durante la prueba (figura 38). Para las dos parcelas se ha contado con una estación meteorológica de la Red de Información Agroclimática que gestiona el IFAPA, dónde se recogen los datos de velocidad y dirección de viento de las condiciones de las evaluaciones.

El objetivo de estas evaluaciones era corroborar los datos obtenidos en el banco de ensayos y confirmar en condiciones de campo la viabilidad del riego a baja presión. Para ellos se utilizaría la base de datos de ensayos con consultas específicas dirigidas a resultados de baja presión.

Por un lado, se hizo una consulta con exigencias altas de uniformidad ($UD > 80\%$) para comprobar qué casuística de aspersores se encontraban para regar a distintas presiones.

Posteriormente, se realizó con exigencias de uniformidades más bajas ($UD > 70\%$) y en condiciones de presiones de riego inferiores (200 kPa). Esta consulta se genera para incluir a todas las casas comerciales e involucrarlas en futuros proyectos.

Como zona de ensayo se ha elegido las condiciones de riego por aspersión en la zona de regable de la Comunidad de Regantes del Sector B-XII del Bajo Guadalquivir en Lebrija (Sevilla). Allí se realizaron evaluaciones simples y simultáneas (macroevaluaciones) para analizar la uniformidad de riego de diversos modelos de aspersores en condiciones de baja presión.

En estas evaluaciones, se pretende que las variables que influyen en los resultados de estos ensayos (velocidad y dirección del viento, presión, marco de riego, etc.) sean prácticamente las mismas para todos los aspersores evaluados.

Las instalaciones de riego por aspersión en las parcelas utilizadas se caracterizan por el siguiente diseño de riego:

- Marco de Riego: 12x15 Rectangular
- Material de tuberías de ramales porta aspersores: PVC PN6 blanco
- Diámetro de la tubería porta aspersores: 63 mm

En las evaluaciones se han integrado 12 configuraciones de aspersores distintas sobre parcelas experimentales de 20 aspersores (utilizando 4 ramales y 5 aspersores por cada ramal)



Figura 38. Detalle del control de la presión de ensayo a través de su fijación en el regulador (izquierda) y calibrada en el aspersor de manera simultánea (derecha).

Para la ejecución de las pruebas de uniformidad de riego a presiones bajas se ha utilizado el protocolo para evaluación de riego por aspersión del IFAPA, basado en la metodología de Merriam y Keller (1978).

En la tabla 11 se detalla los modelos de las evaluaciones llevadas a cabo en lugar y momento. Dichas características servirán para obtener de las mediciones de viento realizadas.

Tabla 11. Fecha y horario de las distintas evaluaciones por modelo de aspersor.

EVALUACIONES SIMULTÁNEAS				1ª Evaluación		2ª Evaluación		3ª Evaluación		
FABRICANTE	MODELO	Diámetro de boquillas en mm		Parcela	Fecha: 30/08/2016		Fecha: 01/09/2016		Fecha: 02/09/2016	
		1ª	2ª		Horario	Duración	Horario	Duración	Horario	Duración
NaanDanJain	5035 SD	4,00	2,50	A-2018	9:45 - 11:47	2 h 01 min	6:18 - 8:25	2 h 07 min	11:15 - 12:44	1h 29 min
Unirain	F46	3,97	2,38	A-2018	9:45 - 11:47	2 h 01 min	6:18 - 8:25	2 h 07 min	11:15 - 12:44	1h 29 min
Vyrsa	Vyr 36	3,57	2,38	A-2018	9:45 - 11:47	2 h 01 min	6:18 - 8:25	2 h 07 min	11:15 - 12:44	1h 29 min
Regaber	Netafin	3,57	2,38	A-2018	9:45 - 11:47	2 h 01 min	6:18 - 8:25	2 h 07 min	11:15 - 12:44	1h 29 min
Unirain	F46	3,57	2,38	A-2018	9:45 - 11:47	2 h 01 min	6:18 - 8:25	2 h 07 min	11:15 - 12:44	1h 29 min
NaanDanJain	5035 SD	3,50	2,50	B-2044	9:45 - 11:55	2 h 10 min	6:32 - 8:44	2 h 12 min	9:26 - 10:50	1h 24 min
Vyrsa	Vyr 37	3,97	2,38	B-2044	9:45 - 11:55	2 h 10 min	6:32 - 8:44	2 h 12 min	7:50 - 9:23	1 h 33 min
Vyrsa	Vyr 36	3,57*	2,38	B-2044	9:45 - 11:55	2 h 10 min	6:32 - 8:44	2 h 12 min	7:50 - 9:23	1 h 33 min
Regaber	R2000	4,00		B-2044	9:45 - 11:55	2 h 10 min	6:32 - 8:44	2 h 12 min	11:02 - 12:36	1h 34 min
Regaber	R2000	3,60		B-2044	9:45 - 11:55	2 h 10 min	6:32 - 8:44	2 h 12 min	9:26 - 10:50	1 h 24 min
Unirain	F46	3,57		B-2044	9:45 - 11:55	2 h 10 min	6:32 - 8:44	2 h 12 min	11:02 - 12:36	1h 34 min
NaanDanJain	6025 SD	3,50		B-2044	9:45 - 11:55	2 h 10 min	6:32 - 8:44	2 h 12 min	9:26 - 10:50	1 h 24 min

* Modelo con vaina esparcidora de chorro.

Las condiciones de viento de las evaluaciones son muy importantes, por ello, se recogieron los datos de viento a través de la estación agroclimática situada en la misma zona regable y en el punto medio entre las dos parcelas de ensayo. Dicha estación

pertenece a la Red de Información Agroclimática del IFAPA de la Junta de Andalucía con la siguiente identificación:

Identificación: Lebrija I

Coordenadas: 36° 58' 35'' N; 06° 07' 34'' W; Altitud 25,0 m

En la figura 39 se presenta el croquis de la disposición de las zonas de evaluación. La colocación de las distintas evaluaciones se realiza a lo largo de 4 ramales contiguos y pertenecientes a una misma acometida de hidrante. Se contó una zona de evaluación para cada modelo de aspersor. La zona de cada evaluación estará compuesta por 5 aspersores a lo largo del ramal y los cuatros ramales y así asegurar las condiciones de contorno de la zona a evaluar. En ella se colocan los pluviómetros a 3x3 m y referenciados por tres aspersores en cada línea. Por tanto, quedaría configurada la zona a evaluar de cada modelo de aspersor por lo siguiente:

- Número de ramales por zona evaluable: 4 ramales.
- Número de aspersores lineal por ramal: 5 aspersores por línea y ramal.
- Número total de aspersores por zona: 20 aspersores.
- Zona a evaluar: 360 m² delimitado en la zona central entre dos ramales y 6 aspersores (3 aspersores por ramal).
- Red de vasos pluviométricos: malla de 3x3 metros.
- Pluviómetros según la norma ISO 7749-2 (1990) sobre la evaluación de aspersores, de 157 mm de diámetro.

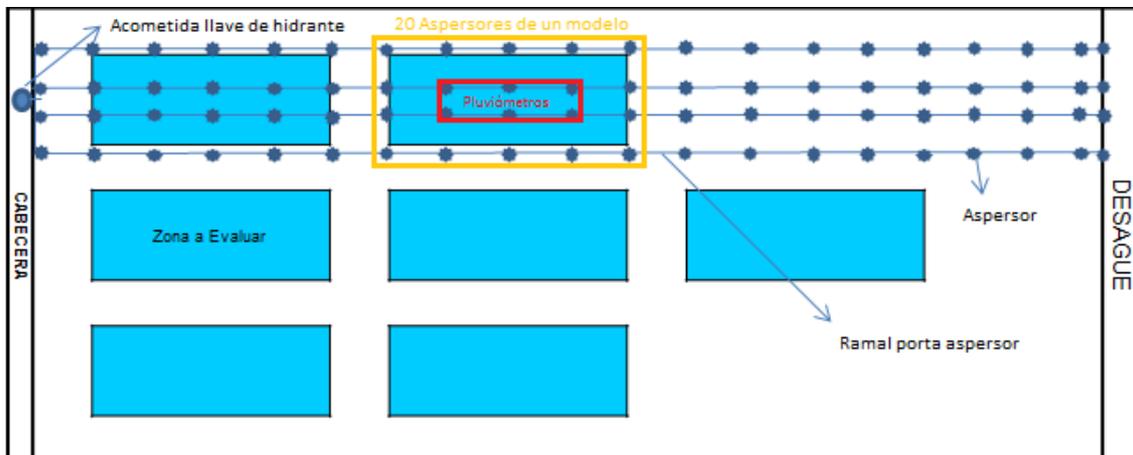


Figura 39. Esquema de la ubicación de las diferentes subparcelas (rectángulos de color azul) de las múltiples evaluaciones y la ubicación de la zona de pluviómetros en cada subparcela.



Figura 40. Imagen de detalle previa a la evaluación, sobre la colocación de los pluviómetros.



Figura 41. Imagen de una de las evaluaciones durante una prueba.

Las condiciones de presión perseguidas en las evaluaciones de todos los aspersores son 200 y 250 kPa.

3.2.6.2. Evaluaciones sobre una campaña de riego en el cultivo de remolacha azucarera.

Para comprobar la viabilidad de los resultados anteriores y demostrar que la baja presión puede presentarse como una opción ventajosa desde el punto de vista de ahorro energético, se persiguió comparar no sólo la uniformidad del riego, sino que la producción no se veía afectada. Para ello, se observó durante toda una campaña de riego en el cultivo de la remolacha azucarera. Dicho ensayo fue desarrollado mediante la colaboración de AIMCRA. Se trata de un ensayo demostrativo con el objetivo de visualizar la viabilidad de la baja presión en todo el ciclo productivo de un cultivo.

En la campaña 2016/2017, se realizaron cuatro ensayos demostrativos, en los que se comparó, sobre todo el cultivo el riego por aspersión de 4 modelos de aspersores en baja presión (200 kPa) ya estudiados anteriormente, con aspersores de agricultores en presión convencional (entre 280 y 350 kPa), con objeto de evaluar el funcionamiento de la baja presión frente al riego habitual de la zona y las probables consecuencias productivas.

Para la instalación se contó con la colaboración material de las casas comerciales de los aspersores involucrados, al igual que, se preserva la identificación de los resultados de cada aspersor individual por motivos de confidencialidad con las empresas colaboradoras.

Se montaron cuatro campos demostrativos, instalándose en cada uno de ellos un modelo de aspersor, cuya elección atendió al proceso de selección llevado a cabo desde los ensayos en el banco automático de riego como posteriormente el análisis del comportamiento en las evaluaciones simultáneas. Las casas comerciales de riego, junto con el modelo de aspersor ensayado se exponen en siguiente la tabla:

Tabla 12. Relación de casas comerciales colaboradoras y modelos de aspersores utilizados.

Casa comercial	REGABER	NAAN DAN JAIN	VYRSA	UNIRAIN
Modelo Aspersor	N-R2000	5035 SD	VYR36	F46
Boquillas (mm)	4,0	3,57xL	3,57x2,5	3,57

La ubicación de los cuatro campos demostrativos para la comparación, fue localizada en la estación de bombeo nº 2 II del subsector C, del sector B-XII de la zona regable del Bajo Guadalquivir (en Lebrija, provincia de Sevilla). En la tabla 13, se expone la localización de las 4 parcelas.

Tabla 13. Localización de los ensayos de riego. Siembra 2016.

Parcela	Localidad	Coordenadas	Altitud (m)
A.- C-2059	Lebrija	36°55'58"N / 6°07'37"O	0
B.- C-2064	Lebrija	36°56'38"N / 6°07'32"O	0
C.- C-2065	Lebrija	36°55'30"N / 6°07'34"O	0
D.- C-2071	Lebrija	36°56'14"N / 6°07'05"O	1

El cultivo que se regó fue remolacha azucarera de siembra otoñal, con el manejo de riego del agricultor. Se diferencian dos tratamientos:

- Agricultor. Se aplica el riego habitual en volumen y presión (>260 kPa), dependiendo de las necesidades del cultivo a través de la información semanal de consumo de AIMCRA.
- Baja Presión. Se aplica el riego con la misma lámina de agua y frecuencia que el Agricultor, a una presión media de 200 kPa.

Para su ejecución se colocaron 2 líneas completas de aspersores del modelo de estudio en cuestión con una presión de 200 kPa, frente a dos 2 líneas de aspersores del agricultor con presiones de trabajo normales tal y como se ilustra en el croquis de la figura siguiente. Dependiendo de la dimensión de la parcela oscilan de 36 a 44 aspersores totales por zona.

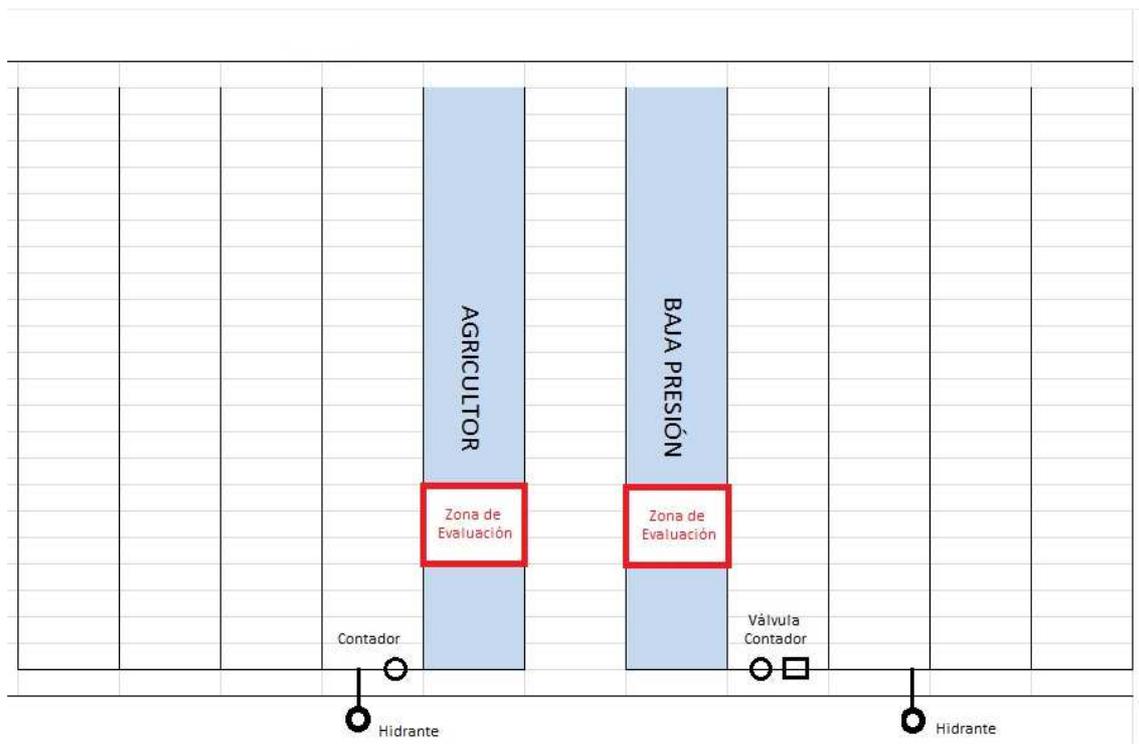


Figura 42. Croquis de diseño de parcela tipo.

Las 4 parcelas constan del mismo diseño de cobertura total. Las características son:

- Marco de riego 12x15 rectangular
- Material de tuberías porta aspersores: PVC PN6 63 mm de diámetro
- Longitud de ramales porta aspersores: 210 a 250 metros
- Aspersor del *Agricultor*:
 - Convencional
 - Boquillas: 3,57 mm

En la zona de *Baja Presión* se instalará el modelo de aspersor para baja presión asignado a cada parcela.

Para el control de riego se instalan los componentes siguientes:

- *Zona Agricultor*: Contador para medir el volumen de agua aportado.
- *Zona Baja Presión*: Válvula-contador para la medición de los volúmenes aplicados y provista de un piloto regulador para el ajuste de presión.

Las Zonas de Evaluación para la medición de la uniformidad del agua quedan fijadas para todas las evaluaciones, cuyas características son:

- La ubicación en cada parcela es simétrica entre ambas zonas, a 1/3 del ramal.
- Superficie de la zona evaluada: 360 m² entre dos ramales y 6 aspersores (3 aspersores por ramal).
- Red de vasos pluviométricos: malla de 3x3 metros.
- Pluviómetros según la norma ISO 7749-2 sobre la evaluación de aspersores y de 157 mm de diámetro y 180 mm de altura.

Los principales datos de cultivo se exponen en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos de cultivo de las 4 parcelas.

OPERACIÓN	C-2059	C-2064	C-2065	C-2071
Cultivo anterior	Trigo	Tomate	Tomate	Algodón
Textura	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
Fecha de siembra	4/11/2016	19/11/2016	7/11/2017	22/10/2016
Variedad	Ciclón	Saramago	Ciclón	Roche
Labores preparatorias	1 Subsolador 1 Kongsquilder 3 Grada de discos 1 Grada Rotativa	1 Subsolador 2 Grada de discos 1 Grada Rotativa	1 Subsolador 2 Grada de discos 2 Grada Rotativa	1 Subsolador 2 Grada de discos 1 Kongsquilder 2 Kongsquilder+rulo
Abonado	Fondo: 325 kg/ha 10-26-0 Coberteras: 1ª cobertera Urea 2ª cobertera Nitrato (92+69)	Fondo: 300 kg/ha 10-26-0 Coberteras: 3 coberteras Nitrato (69+69+34,5)	Fondo: 500 kg/ha 8-24-8 Coberteras: 1ª cobertera Urea 2ª cobertera Nitrato (92+69)	Fondo: 300 kg/ha 18-46-0 Coberteras: 2 coberteras Nitrato (86+86)
Densidad de plantas siembra	142.857 plantas/ha	125.000 plantas/ha	133.333 plantas/ha	137.931 plantas/ha
Tratamientos fungicidas	5	3	3	4
Tratamientos insecticidas	5	3	3	4

Para la comparación de los aspersores con distinta presión, se han realizado:

1. Evaluaciones de uniformidad en las dos zonas
2. El análisis de rendimiento y calidad con la toma de 10 muestras de 6 m² en cada zona.

Todos los parámetros estudiados son agrupados y evaluados por parcela y en ningún caso, deben ser comparadas entre distintas parcelas. Siempre se comparará la *Zona Agricultor* con la *Zona de Baja Presión* dentro de una misma parcela.

Las magnitudes evaluadas son:

- La cantidad de agua recibida por el cultivo (precipitación + riego).
- Uniformidad del riego a través de evaluaciones según el CU. Producción: Para la valoración del rendimiento y la calidad de la producción se realiza una toma de muestra en toda la superficie por la imposibilidad de recolectar de manera diferencial la parcela completa. Para ello se realiza un muestreo representativo con su análisis estadístico del conjunto de las muestras para cada parcela (10 muestras de remolacha por zona, en una superficie de 6 m² de dimensiones de 1,50x4 m). Se utiliza para la comparación de media el test LSD a p=0,05.

En cada una de ellas se ha calculado:

- Rendimientos: la producción de raíz (t/ha), riqueza (grados polarimétricos), rendimiento teórico en azúcar por ha e índice económico del agricultor (IEA - t/ha 16°).
- Calidad: se han medido los parámetros de α -amino, sodio, potasio y reductores para calcular la pureza del jugo en tanto por ciento.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de la fase de diseño del banco de ensayo de aspersores se ha empezado a obtener información válida como consecuencia de este trabajo. La fase de montaje del banco ha requerido de la metodología de ensayo-error para acciones de mejoras. Igualmente, en la fase de puesta a punto se han ido obteniendo resultados y todo ello ha quedado definido fundamentalmente en el apartado de material y métodos. Por tanto, el resultado final de estas dos fases es la disponibilidad de un banco de ensayos automático con viento operativo que un futuro disponga de capacidad para nuevos aspersores y pretenda abordar nuevos estudios.

En este apartado se han recogido los resultados de la explotación del banco de ensayo en lo referido a la evaluación de aspersores y las líneas complementarias de evaluación de los datos obtenidos.

Los resultados de ensayos obtenidos por el uso del banco automático de ensayo tienen un volumen excesivo y se recogen los datos de uniformidad en el Anexo II (en formato digital). También se recogen en un segundo apartado los ensayos alternativos sin viento realizados con la metodología de ensayos radiales. De toda esta información además de disponer de resultados individuales de multitud de situaciones concretas, se han desarrollado análisis de grupos de resultados con que generar criterios de elección de aspersores para futuros diseños de riego por aspersión.

Complementariamente a los resultados obtenidos en el banco de ensayo, se ha recogido información de evaluaciones en campo complementarias para completar los estudios de uniformidades de riego en condiciones de baja presión, haciendo un análisis de estos resultados. Por tanto, se dispone de:

- Resultados de evaluación de campo de los aspersores seleccionados y aptos para el riego en presiones más bajas a partir de los datos generados del banco de ensayo de aspersión.
- Resultados de evaluaciones de una campaña de riego sobre un cultivo de cuatro de los mejores aspersores seleccionados en la fase anterior y estudio de su viabilidad.

4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN EL BANCO AUTOMÁTICO

Para definir los resultados que se obtienen del uso del banco de ensayos y el potencial de estos datos, inicialmente se describe a modo de resumen la operativa de adquisición de los mismos. Para ello simplemente se resetea el SAD de los datos que pudiera tener de los días anteriores, se coloca un aspersor en soporte portaaspersor y se procede como se ha indicado en el apartado 4.2.3.2. Al finalizar un periodo continuado de funcionamiento, y de la obtención de las dos matrices de datos (distribución pluviométrica y datos de viento), se utiliza para cada periodo de tiempo los datos para la obtención de resultado de cada ensayo y posteriormente se procesan los resultados para cada ensayo individual.

Con el fin de mostrar el potencial de la información generada, se describe un ejemplo de uno de los ensayos extraídos de una jornada de riego cualquiera. Corresponden a una hora de datos recibidos (Salvatierra et al., 2015a).

Una vez evaluadas las condiciones de viento de la matriz de datos de viento extraídas de la matriz general de viento (desviación estándar de la velocidad del viento no superior a 1 m/s y 20° en dirección) se caracterizaron estas condiciones con una dirección y velocidad media del periodo seleccionado. La Figura 43 representa los datos obtenidos del SAD con las condiciones de contorno mostradas en la Tabla 15.

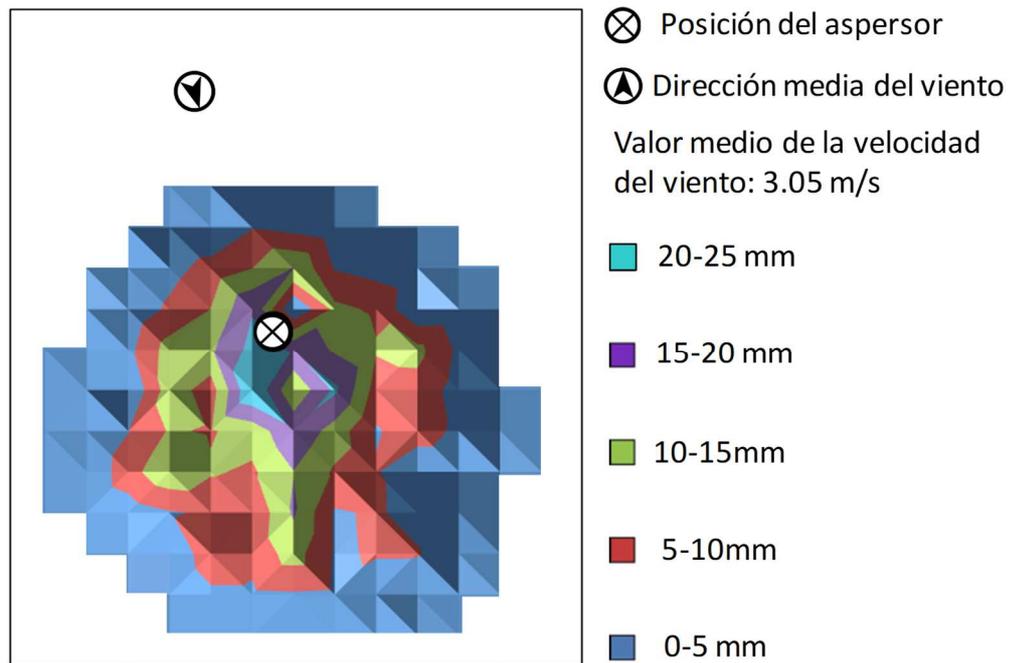


Figura 43. Ejemplo de la distribución de lluvia de un aspersor con viento (velocidad media de 3,05 m/s durante una prueba de 60 minutos).

Posteriormente, los datos numéricos de estos resultados se han introducido en el programa que simula condiciones reales de solapamiento de marcos y direcciones de viento (programa Space Pro). De esta manera, se calcula la distribución del agua para diferentes configuraciones de disposición de riego para las tres direcciones de viento ya estandarizadas (paralela, oblicua y perpendicular a la dirección del ramal de riego). Las Figuras 44 y 45 muestran los resultados de los marcos de riego más comunes en España. Estos resultados son sólo una muestra de la capacidad de análisis de la uniformidad del riego por aspersión. Además de éstos, también se pueden simular otros diseños y direcciones del viento.

Tabla 15. Variables involucradas en la prueba y los valores recogidos.

Variable	Descripción
Aspersor probado	Unirain F46 (Unirain SA, España)
Diámetro de las boquillas	3,17 mm (primario) y 2,38 mm con la paleta
Presión de trabajo	300 kPa
Duración del ensayo	60 minutos
Altura del aspersor	1,30 m
Velocidad media del viento	3,05 m/s
Dirección media del viento	5,99 rad con respecto al Norte geográfico
Caudal del aspersor	$2,65 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

La Figura 44 muestra los resultados uniformidad en la distribución (UD), coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU), coeficiente de programación (SC) y pluviosidad (P) para los marcos de 12x12, 12x15 y 12x18 m en tres direcciones de viento (paralelo, oblicuo y perpendicular al lado de riego). Los mejores valores de los indicadores de uniformidad se obtienen para la disposición 12x12, que difieren significativamente dependiendo de la dirección del viento. Para todos los diseños, se observa una pequeña mejora en el UD con un viento oblicuo, en comparación con otras condiciones, mientras que la dirección del viento perpendicular ofrece los peores resultados. Para los marcos 12x15 y 12x18, los coeficientes obtenidos presentan valores más bajos (siendo el peor el último) y las diferencias entre los tres tipos de dirección del viento son más pronunciadas. En el tercer caso, las diferencias entre los tipos paralelos y oblicuos se atenúan, siendo el viento perpendicular que motiva los peores coeficientes.

Por otro lado, se ha estudiado la posibilidad de utilizar distribuciones de aspersores similares con diferentes formas. La figura 45 muestra una comparación entre la disposición rectangular de 12x15 analizada en el caso anterior con la disposición triangular de 15x12. Valores similares de los coeficientes se observan con un viento oblicuo. Sin embargo, si el viento es paralelo o perpendicular a los laterales, se obtiene una mejora considerable con una disposición triangular. Por lo tanto, en una situación en la que la dirección del viento no es oblicua o cambia a menudo, se recomienda una disposición triangular para esta disposición. Así, gracias a este tipo de análisis, se puede lograr una mejora en la uniformidad simplemente cambiando la configuración sin ningún costo de inversión adicional.

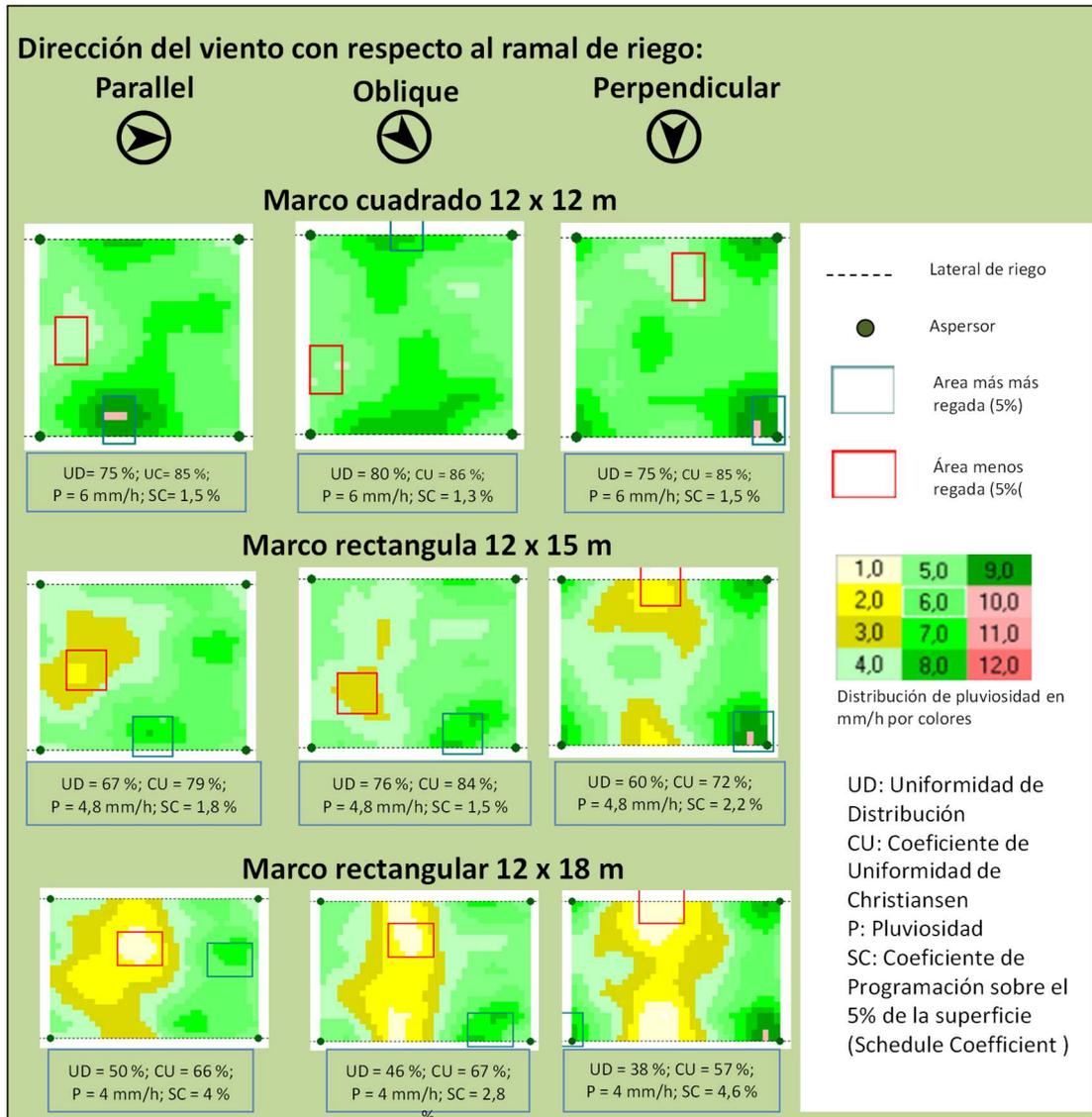


Figura 44. Resultados obtenidos de programa del ensayo y para un ejemplo con tres diseños de riego y tres direcciones del viento.

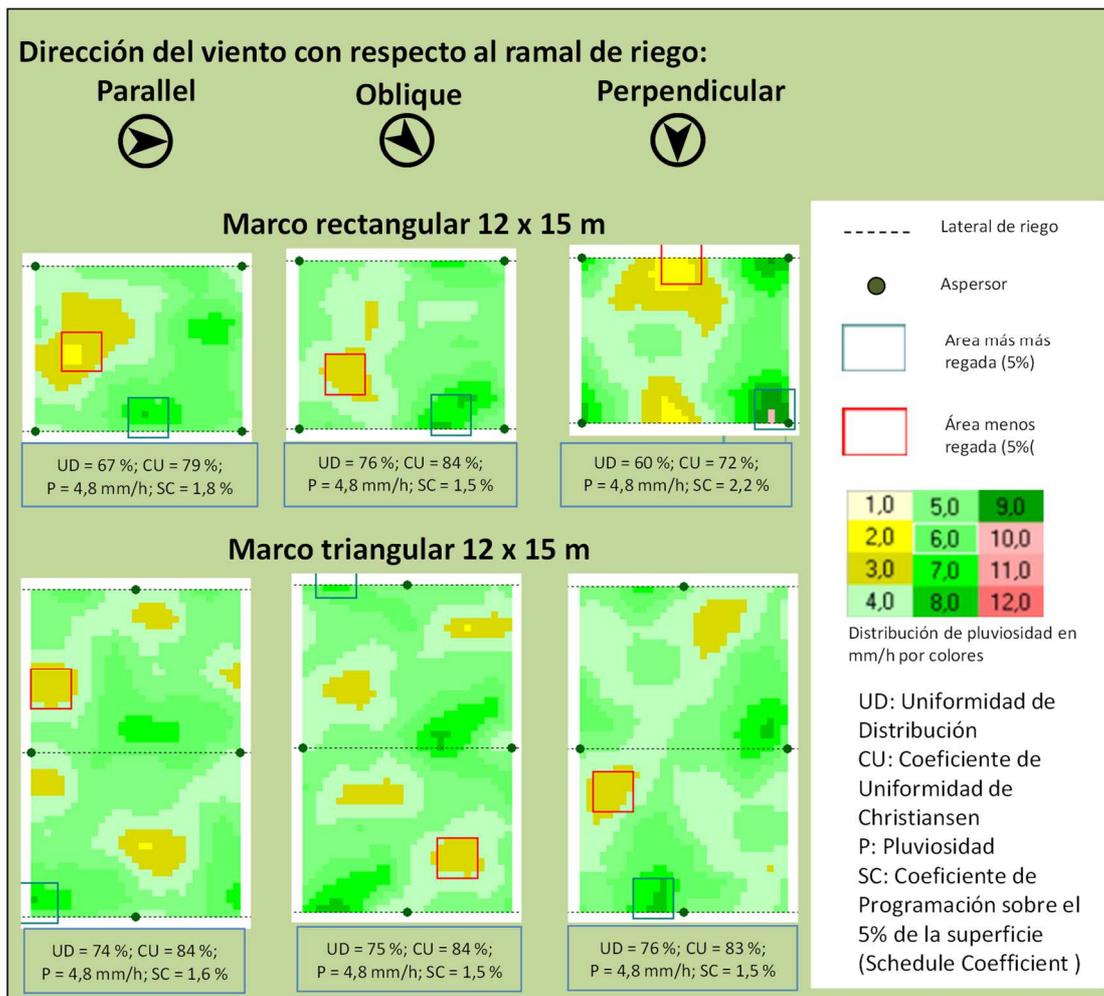


Figura 45. Los resultados del ensayo comparando la disposición rectangular con la disposición triangular en el marco 12x15.

4.1.1. Resultados de los ensayos en el banco automatizado.

Teniendo en cuenta todas las combinaciones, el número total de resultados generados con viento fue de 29.160. Por lo tanto, se analiza la uniformidad de riego en la mayoría de las situaciones comunes que ocurren en campo.

De este modo, se han obtenido los valores de Uniformidad de Distribución particularizados para las posibles situaciones de funcionamiento en campo de los aspersores utilizados habitualmente en riego por aspersión de cobertura total en el cultivo de la remolacha azucarera.

Los resultados, están disponibles en un archivo digital que acompaña a la tesis y relacionados en el Anexo II y están ordenados de la siguiente forma:

- Tabla índice de los aspersores ensayados con viento (Anexo II, apartado II.1).
- Resultados de los aspersores ensayados con viento. Estos se identifican con las siguientes variables: modelo del aspersor, boquillas integradas, presión del

ensayo, caudal, velocidad del viento. Se muestran las distintas Uniformidades de Distribución para cada marco de riego, bien para una distribución rectangular o triangular. Además, se utilizaron tres direcciones distintas con respecto al ramal de riego.

- Tabla índice de los aspersores ensayados sin viento (Anexo II, apartado II.2).
- Resultados de los aspersores ensayados sin viento. Estos se identifican con las siguientes variables: modelo del aspersor, boquillas integradas, presión del ensayo, caudal. Los ensayos realizados desde esta modalidad son de un solo modelo de aspersor, con el único objetivo de observar la diferencia de Uniformidad de Distribución en condiciones de laboratorio y condiciones reales.

Todos estos datos fueron incorporados a la base de datos descrita en el apartado 3.2.5. Esta informatización de los datos servirá de base para una aplicación posterior que asista a cualquier tipo de análisis. De esta forma el impacto de estos resultados será sumamente útil.

Por lo tanto, mediante una herramienta de consulta en la base de datos de resultados cualquier escenario de riego se puede evaluar cómo se desee.

4.1.2. Ejemplo de estudio de la influencia de varias variables sobre la uniformidad de riego para diferentes tipos de aspersores.

El conjunto de resultados puede ser utilizado para múltiples objetivos con un propósito estratégico. Para ello, se ha utilizado el modelo estadístico de regresión lineal múltiple para un análisis de datos globales con variables dependientes e independientes. Esta técnica permite establecer relaciones entre las variables del conjunto de datos.

Se han clasificado conjuntos de aspersores en función al tipo de funcionamiento quedando los siguientes conjuntos de resultados:

- Conjunto 1: 12.150 resultados de coeficientes de uniformidad aspersores de impacto convencionales con boquillas hexagonales en condiciones de viento.
- Conjunto 2: 10.206 resultados de coeficientes de uniformidad aspersores de cabeza rotativa de impacto no convencional con boquillas de bayoneta.
- Conjunto 3: 6.804 resultados de coeficientes de uniformidad de aspersores rotativos.

La figura 46 muestra el resultado de aplicar una regresión lineal múltiple a los tres conjuntos de aspersores. Se estima la influencia de cada variable en la uniformidad de riego para los diferentes grupos de aspersores considerados. Los valores de R^2 de cada grupo son: 0,5801 para todos los aspersores analizados, 0,7392 para los aspersores de impacto, 0,6017 para aspersores de cabeza rotativa de impacto no convencional con boquillas de bayoneta, y 0,581 para los aspersores rotativos. Todos son valores buenos para una regresión lineal múltiple, ya que se encuentran en el rango de 0,5 a 0,85, según Rojo (2007) (por encima del valor de 0,85 es considerado como sospechoso). La gráfica

define la influencia de cada variable sobre la uniformidad del riego para los diferentes grupos de aspersores considerados.

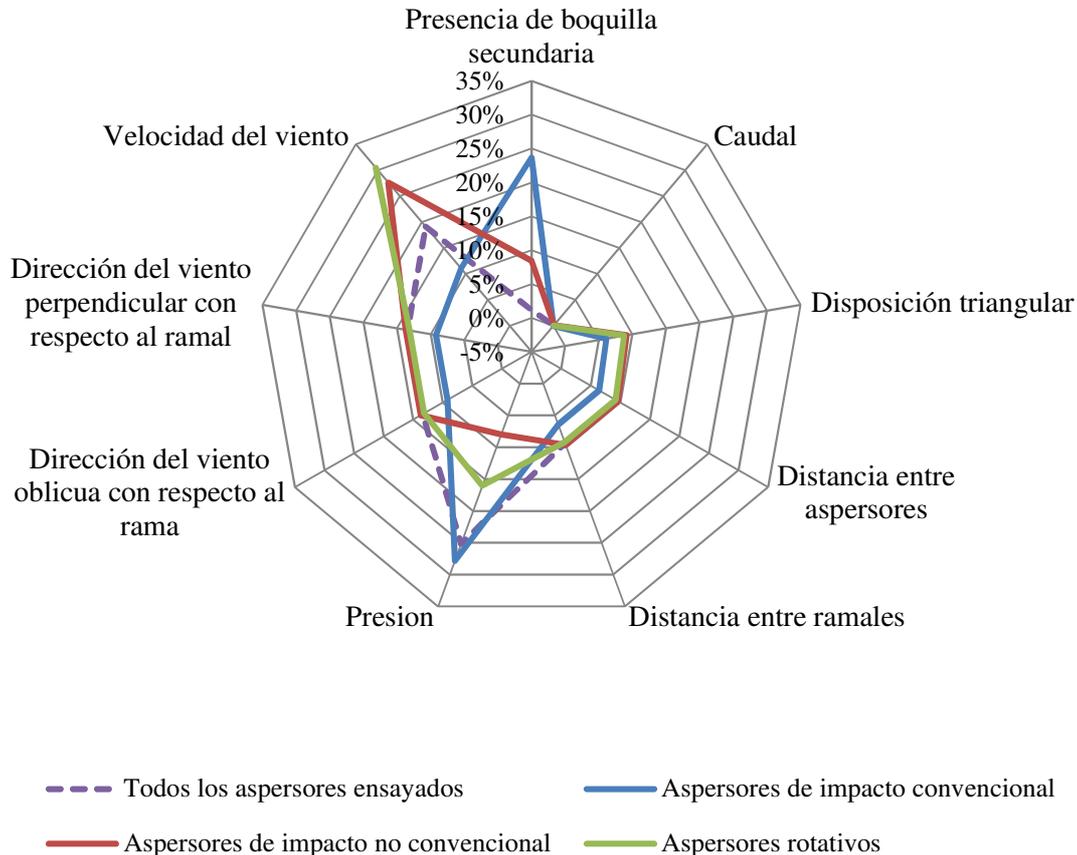


Figura 46. Influencia de cada variable sobre la uniformidad de riego de en cada conjunto de aspersores probados con viento.

Este análisis da mucha información en relación con cualquier toma de decisiones necesarias. Por ejemplo, cuando se usan aspersores convencionales de impacto, la disposición o las condiciones del viento tienen menos influencia. Sin embargo, la presión de trabajo y la existencia de una boquilla secundaria son factores clave. Por otro lado, para los aspersores no convencionales de impacto o rotatorios, la disposición y el viento son las variables más importantes en juego. Pero estas son conclusiones generales obtenidas de un gran conjunto de datos.

La escala de análisis se puede reducir como se muestra en la figura 47, que compara el conjunto de aspersores convencionales de impacto con y sin viento (17.982 resultados obtenidos para comparar) Los resultados sin viento fueron obtenidos a través de banco de ensayo radial convencional montado para ensayos alternativos. Los valores

de R^2 de la regresión de cada conjunto son: 0,7392 para los aspersores con viento y 0,6345 para los aspersores sin viento. En este caso el número de resultados se reduce y el objetivo del análisis es diferente. En este ejemplo, la presión y la disposición de los aspersores son menos importantes en condiciones de viento que sin viento, pero la presencia de una boquilla secundaria tiene un mayor efecto cuando hay viento.

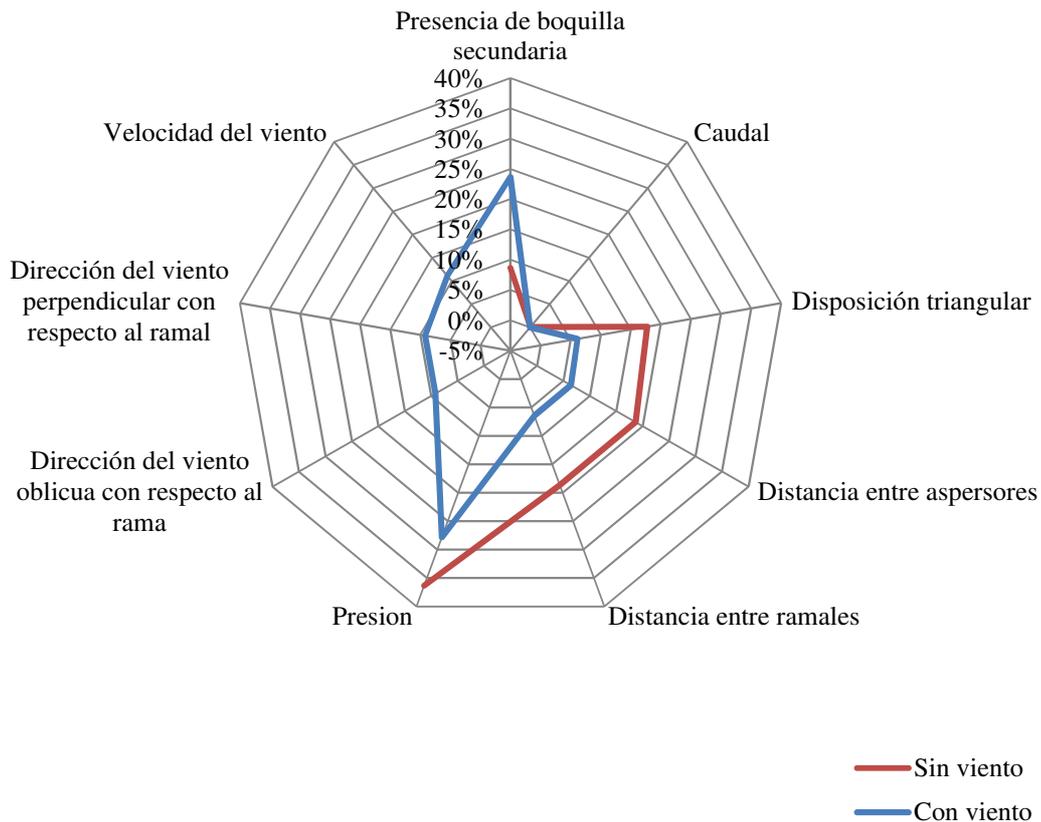


Figura 47. Influencia de cada variable sobre la uniformidad de riego de aspersores de impacto convencionales con y sin viento.

Otros autores como Faria et al. (2013) también han señalado el potencial de usar la simulación computacional como una ayuda para determinar la uniformidad en la distribución del agua de los rociadores que trabajan bajo diferentes condiciones. Gracias a la cantidad de datos generados, se pueden definir las principales variables en juego para cada situación.

4.1.3. Análisis de los resultados orientados al riego en baja presión.

Según lo expuesto en el apartado 3.2.5.3 se procede a exponer los resultados de los tres pasos señalados. Para ello se realizó un primer análisis de conjunto para la situación más favorable de los marcos más frecuentes en riego por aspersión (12x12, 12x15 y 18x18); en tal caso se focalizó sobre el marco de 12x12, ya que en situaciones de cualquier índole es el marco que mejores resultados arroja ante situaciones adversas.

El marco de riego 12x12 supone el 1,54% del total de resultados obtenidos en el banco de aspersores. De este conjunto específico se escogen los ensayos con presiones bajas (menores de 350 kPa) que corresponden al 61% del conjunto (274 resultados). Y sobre ellos se obtienen los resultados siguientes:

- El 48% son uniformidades aceptables estando por encima de una UD del 75% (CAP 2001)
- El 33% son buenas, por encima del 80% (CAP, 2001)
- El 16% son excelentes, por encima del 85% (CAP, 2001; Nin et al., 2008; Clemmens y Dedrick, 1994)

Por otro lado, los ensayos a la presión nominal habitual (350 kPa) muestran los valores siguientes: 57%, 36% y 12% respectivamente y según la clasificación anterior de uniformidades. Los valores a baja presión no son muy diferentes, y por tanto es interesante un estudio más pormenorizado de los resultados generados para completar una selección de aspersores en presiones por debajo de la tradicionalmente recomendada por los fabricantes.

La figura 48 representa la distribución los porcentajes de resultados de los aspersores sobre los tres valores críticos de UD y para los tres marcos más comunes que se dan en riego por cobertura (12x12, 12x15 y 18x18). Como valores críticos de UD en aspersión se consideran: UD aceptable (>75%) y buena (>80%). Los valores incluidos son con multitud de condiciones de viento y contemplan presiones de 350, 250 y 200 kPa.

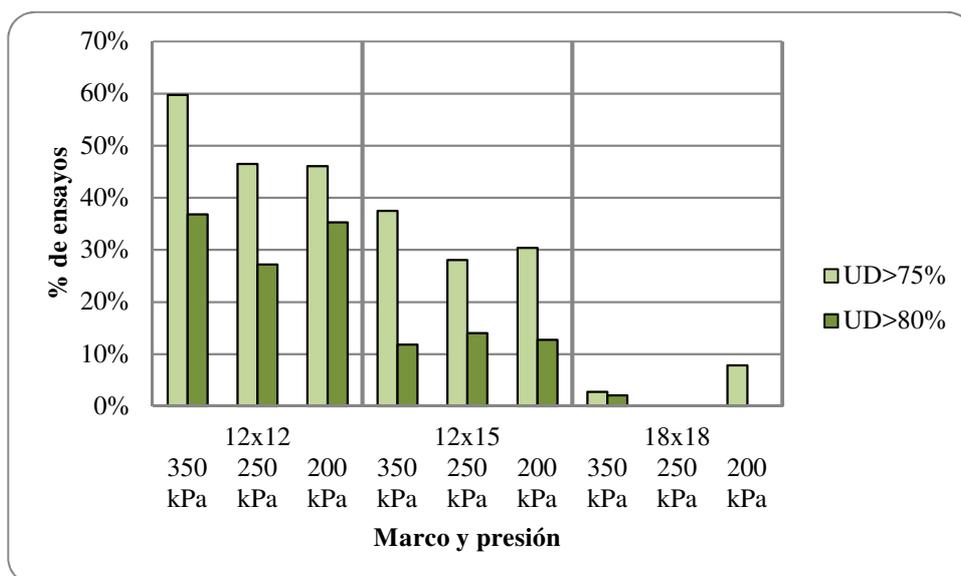


Figura 48. Porcentaje de aspersores ensayados que tienen UD inferiores a 75 y 80 %, para cada una de las presiones ensayadas y según los marcos más utilizados en riego por aspersión.

En la figura 48, se aprecian unos resultados para el marco 12x15 no tan buenos como en el marco de 12x12, pero mejores que para el marco de 18x18.

En concreto, en el marco de 12x15 ocurre que el número de resultados obtenidos con buena uniformidad (>80%) son similares en las tres presiones ensayadas. Es decir, se confirma la viabilidad de bajar la presión de riego en régimen de viento moderado (0,9 – 2,9 m/s), que son los valores disponibles en los datos analizados.

De este modo, sería posible trabajar a presiones más bajas siempre que el emisor que se utilice se haya ensayado previamente y funcione en las mismas condiciones en el ensayo.

En las figuras 49 y 50, se muestra el porcentaje de ensayos en los que la UD supera el 75 % y el 80 %, respectivamente, cuando se usa un aspersor de impacto con boquillas hexagonales. Este modelo de aspersor es uno de los más extendidos en el regadío español. Se muestran los resultados comparando dos situaciones dependiendo de si hay viento o no.

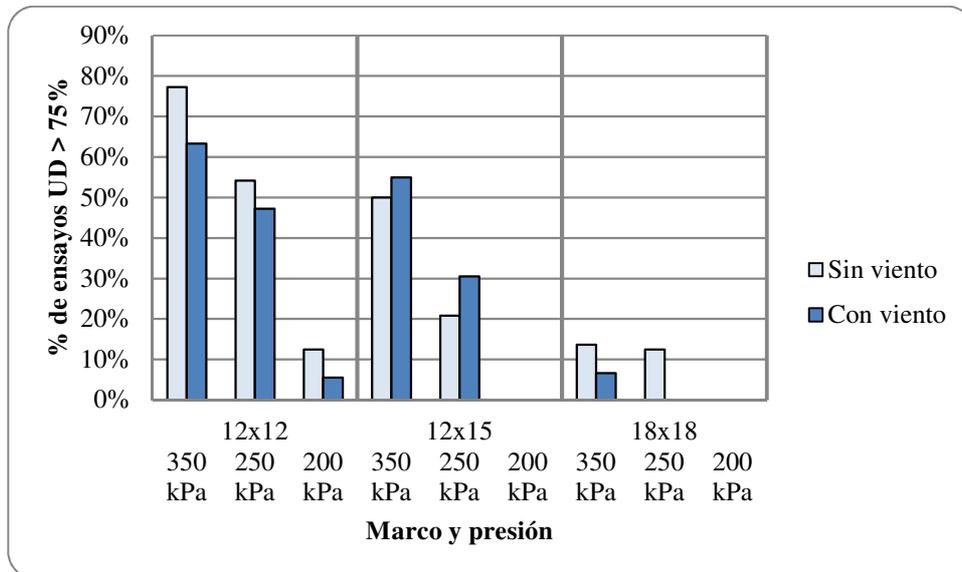


Figura 49. Ensayos realizados de un modelo convencional de aspersor de impacto, señalando aquellos que tienen UD>75%, para cada una de las presiones ensayadas y según los marcos más utilizados en riego por aspersión.

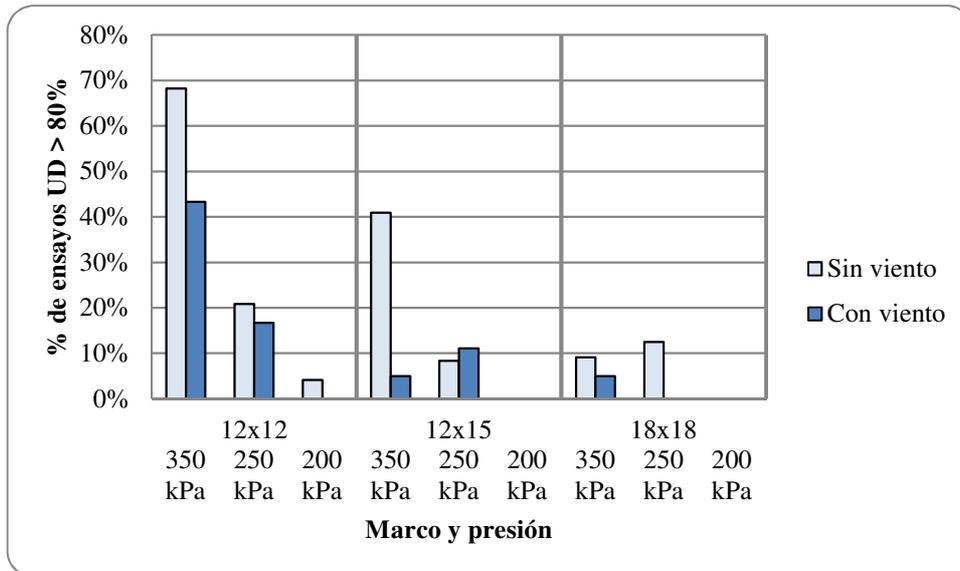


Figura 50. Porcentaje de ensayos realizados de un modelo convencional de aspersor de impacto que presentan una UD > 80%, para cada una de las presiones ensayadas y según los marcos más utilizados en riego por aspersión.

Llama la atención que para el marco de 12x15, el porcentaje de ensayos que arrojan una UD > 75 % es mayor en condiciones de viento, al contrario que en el resto de situaciones.

Antes de seleccionar los modelos de aspersores y boquillas óptimos, se procedió de igual manera a analizar la influencia del viento sobre los valores de UD obtenidos del conjunto de la base de datos y de la misma manera que se abordó la figura 48.

El objetivo de dicho análisis fue poder conocer cómo influyen las presiones en los distintos rangos de valores de velocidad de viento sobre la UD. Igual que en los resultados expuestos en la figura 46, se diferenciaron los tres marcos más utilizados en el riego por aspersión. En las figuras 51, 52 y 53, se muestran las correspondencias entre los valores de UD frente a la variable viento y para cada una de las presiones ensayadas. Las líneas mostradas son ajustes de curvas polinómicas de quinto grado. La finalidad de esta gráfica es una visión global de la tendencia de la Uniformidad de Distribución para las distintas presiones.

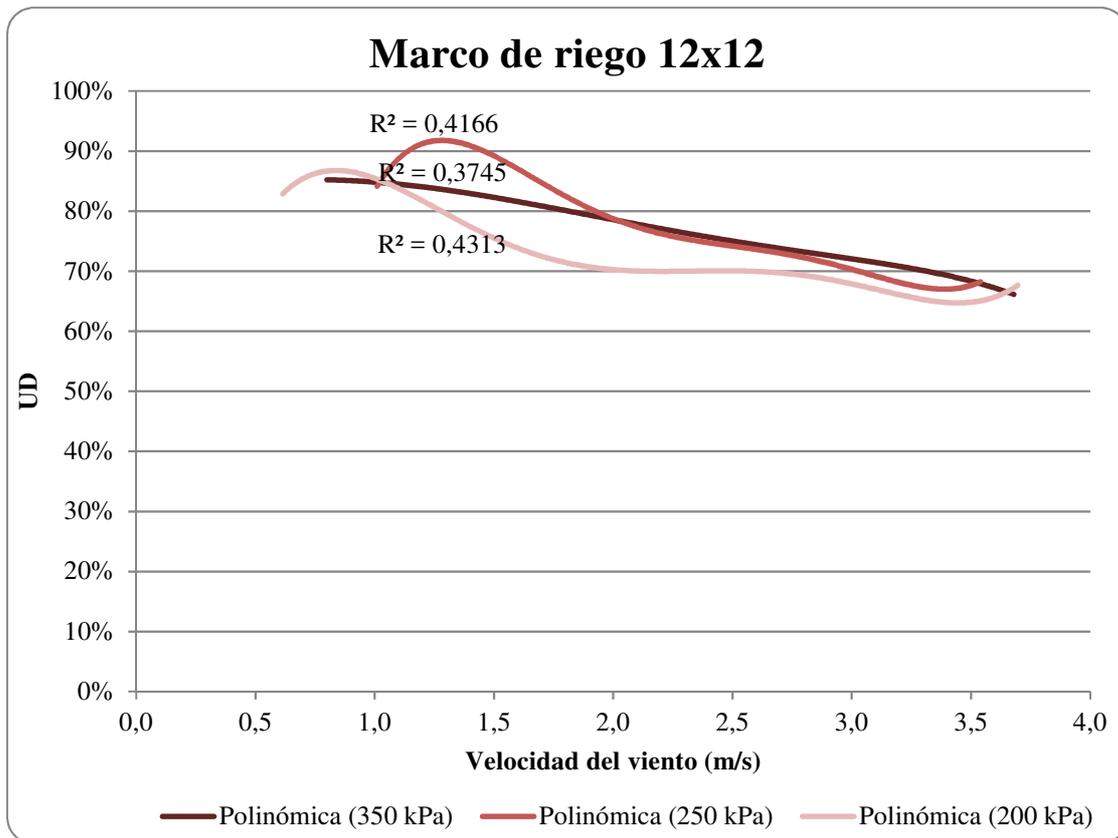


Figura 51. Gráficas de las líneas de tendencia polinómica de grado 5 resultante de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los tres valores de presiones ensayadas para el marco de riego de 12x12.

Estos resultados presentados se obtienen a través de consultas sobre la base de datos elaborada. Para el caso de la figura 51, se han seleccionado para marcos de riego 12x12 tres conjuntos de resultados de ensayo: los realizados a 350, a 250 y a 200 kPa de presión. Igualmente se muestran los coeficientes de ajuste de las líneas de tendencias sobre los resultados recopilados para cada conjunto de evaluaciones para las distintas presiones. A continuación, se muestra de la misma forma las figuras 52 y 53 para los marcos de 12x15 y 18x18, respectivamente.

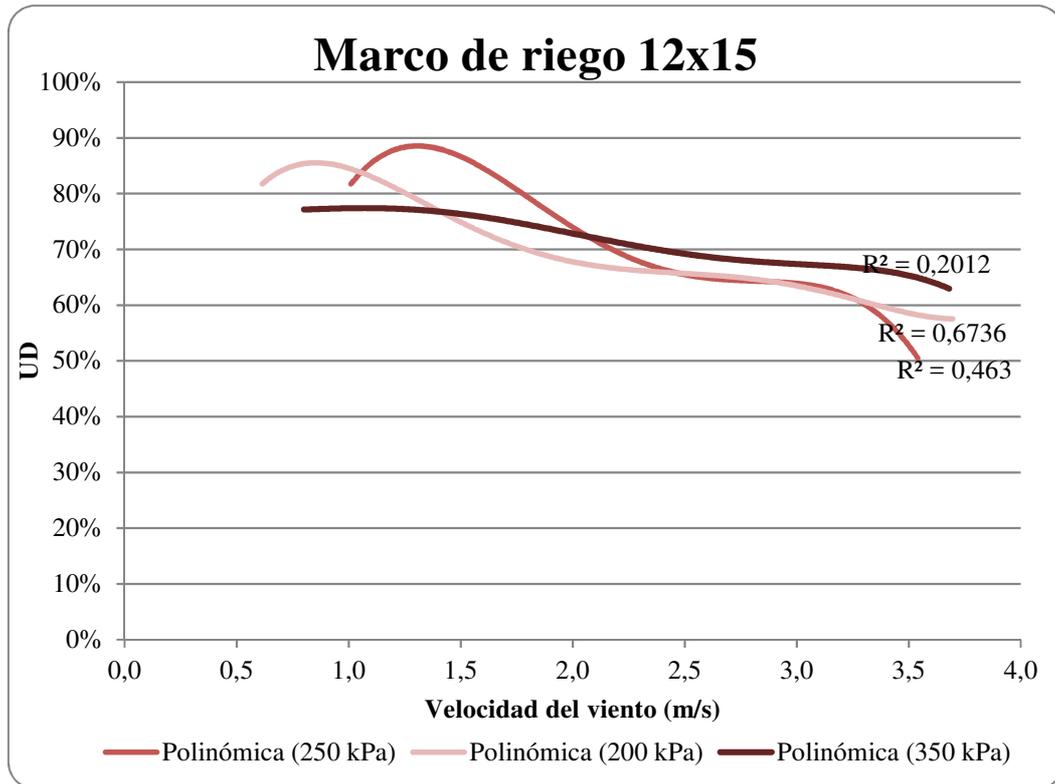


Figura 52. Gráficas de las líneas de tendencia de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los tres valores de presiones ensayadas para el marco de riego de 12x15.

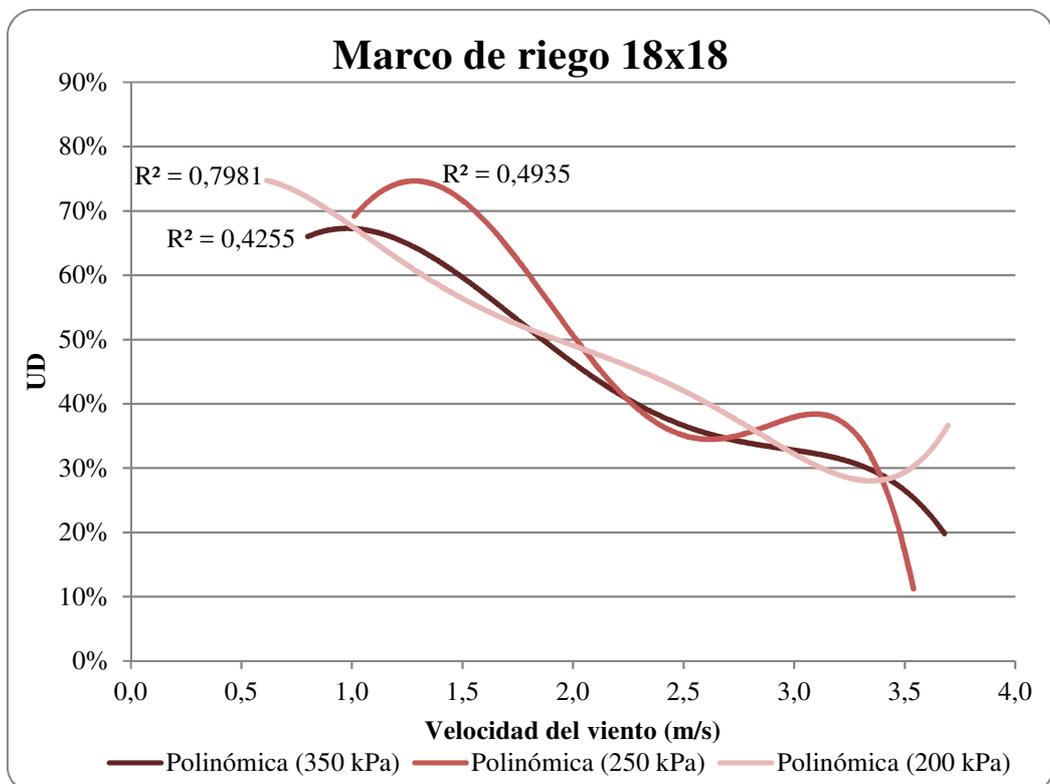


Figura 53. Gráficas de las líneas de tendencia de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los tres valores de presiones ensayadas para el marco de riego de 18x18.

Se observa cómo en todos los casos, como es obvio, la UD tiende a disminuir cuanto mayor es la velocidad del viento. Los coeficientes de ajustes de las regresiones correspondientes tienden a ser mayores a presiones bajas y marcos de riego más amplios. De este modo, cuanto menor es la presión de trabajo y mayor el marco de riego, mayor certeza se tiene de los valores de la UD con respecto a la velocidad del viento.

La influencia de la velocidad del viento sobre la UD es considerablemente mayor para marcos de 18x18 (figura 53), mientras que el marco de 12x12 presenta las menores oscilaciones de UD a medida que la velocidad del viento aumenta (figura 51).

En un estudio más concreto y orientado a ensayos de campo, en marcos más pequeños (12x12 y 12x15) es posible bajar las presiones hasta 250 kPa, siempre que la velocidad de viento estuviera por debajo de 2 m/s. En los marcos mayores también sería posible, pero con valores de velocidad de viento más restrictivos. Esta aproximación generalista jamás debe considerarse como una recomendación para todos los casos de modo que habrá que recurrir a ensayos similares a los descritos que se correspondan con las condiciones a evaluar.

Dado que los sistemas de cobertura total en marco de 12x15 están muy extendidos en la vasta comarca de riego del Bajo Guadalquivir en el Sur de España se procedió a analizar con más detalle distintos aspersores con ese marco.

En la tabla 16 se muestra los aspersores y variables para buenas Uniformidades de Distribución (UD>80%) con el objetivo de asegurar la viabilidad en baja presión en condiciones óptimas de riego. Por tanto, se comparan los resultados obtenidos para una presión de funcionamiento de 350, 250 y 200 kPa. Se analizan aspersores de cuatro fabricantes distintos para dos tipos de marco (rectangular y triangular) y distintas velocidades y direcciones del viento.

Tabla 16. Resultados de la consulta de la base de datos de ensayos del banco automático con viento para Uniformidades de Distribución mayores del 80% en marco de 12x15 y para presiones de 350, 250 y 200 kPa.

Identificación del ensayo					Presión 350 kPa			Presión 250 kPa			Presión 200 kPa				
Fabricante	Modelo	Boquilla principal	Boquilla secundaria	Vaina	Marco	Velocidad viento (m/s)	Dirección del viento con respecto al ramal	Pluviosidad (mm/h)	Velocidad viento (m/s)	Dirección del viento con respecto al ramal	Pluviosidad (mm/h)	Velocidad viento (m/s)	Dirección del viento con respecto al ramal	Pluviosidad (mm/h)	
Naandanjain	5035	5/32	si	si	Rectangular	1,6	Perpendicular	8,45	2,1	Perpendicular	7,09	1,6	Perpendicular	6,25	
						1,6	Oblicua	8,45							
						1,6	Paralela	8,45							
													1,6	Oblicua	6,25
					Triangular	1,6	Perpendicular	8,45	2,1	Perpendicular	7,09	1,6	Perpendicular	6,25	
						1,6	Oblicua	8,45				1,6	Oblicua	6,25	
1,6	Paralela	8,45													
Nelson	R33 LP	11/64			Rectangular	1,9	Perpendicular	7,56							
Unirain	F 46 PRO	3/16	si	si	Rectangular	2	Perpendicular	10,7							
					Triangular	2	Perpendicular	10,7							
	F46	5/32	si	si	Triangular				1	Oblicua	7,36				
									1	Paralela	7,36				
									1	Perpendicular	7,36				
9/64	si	Rectangular	1,5	Paralela	5,05	1	Oblicua	7,36							
Vyrsa	Vyr 36	5/32	si	si	Rectangular	2,9	Paralela	8,48	2,1	Paralela	7,18				
						2,9	Perpendicular	8,48	2,1	Perpendicular	7,18				
					Triangular	2,9	Paralela	8,48	2,1	Paralela	7,18	0,8	Paralela	6,34	
						2,9	Perpendicular	8,48	2,1	Perpendicular	7,18	0,8	Perpendicular	6,34	
						2,6	Perpendicular	7,5	1,5	Perpendicular	6,78	0,9	Perpendicular	5,37	
		9/64	si	si	Rectangular				1,5	Oblicua	6,78	0,9	Oblicua	5,37	
									1,5	Paralela	6,78	0,9	Paralela	5,37	
					Triangular	2,6	Perpendicular	7,5	1,5	Perpendicular	6,78	0,9	Perpendicular	5,37	
									1,5	Oblicua	6,78	0,9	Oblicua	5,37	
									1,5	Paralela	6,78	0,9	Paralela	5,37	
Vyr 37	5/32	si	si	Triangular	2,7	Perpendicular	7,82								

En la tabla anterior se refleja simultáneamente las tres consultas realizadas en la base de datos sobre las tres presiones. Al tratarse del criterio más exigente (UD>80%), los resultados obtenidos son poco decisivos a la hora de analizar los datos como determinantes para casos reales.

Igualmente, y para dar cabida a más modelos se introdujo un filtro menos exigente (UD > 70%) para la presión de 200 kPa, de manera que en la situación de más baja presión se pudieran observar el comportamiento de una amplia gama de aspersores (tabla 17).

Tabla 17. Resultados de la consulta de la base de datos de ensayos del banco automático con viento para Uniformidades de Distribución mayores del 70% en marco de 12x15 y para presiones de 200 kPa.

Fabricante	Modelo	Boquilla principal	Boquilla secundaria	Vaina	Marco	Dirección del viento con respecto al ramal	Velocidad viento (m/s)	Pluviosidad (mm/h)	Evaporación y arrastre (%)
Naandanjain	5035	5/32	Si	Si	Rectangular	Oblicua	1,612	6,25	7,92
						Paralela	1,612	6,25	7,92
						Perpendicular	1,612	6,25	7,92
		Triangular	Oblicua	1,612	6,25	7,92			
			Paralela	1,612	6,25	7,92			
			Perpendicular	1,612	6,25	7,92			
	6025 SD	9/64	Si	Si	Rectangular	Perpendicular	2,719	5,22	13,36
					Triangular	Perpendicular	2,719	5,22	13,36
					Triangular	Perpendicular	2,973	3,93	14,38
Nelson	R2000 WF	9/64			Rectangular	Oblicua	0,897	3,81	6,06
						Paralela	0,897	3,81	6,06
						Perpendicular	0,897	3,81	6,06
		Triangular	Oblicua	0,897	3,81	6,06			
			Paralela	0,897	3,81	6,06			
			Perpendicular	0,897	3,81	6,06			
	R33 LP	11/64			Rectangular	Paralela	2,799	2,96	15,59
					Perpendicular	2,799	2,96	15,59	
					Rectangular	Perpendicular	2,596	5,54	10,25
				Triangular	Perpendicular	2,596	5,54	10,25	
Unirain	F 46	9/64		Si	Rectangular	Oblicua	2,423	3,61	12,17
						Perpendicular	2,423	3,61	12,17
					Triangular	Oblicua	2,423	3,61	12,17
						Perpendicular	2,423	3,61	12,17
Vyras	Vyr 36	5/32	Si	Si	Rectangular	Oblicua	0,843	6,34	5,19
						Paralela	0,843	6,34	5,19
						Perpendicular	0,843	6,34	5,19
		Triangular	Oblicua	0,843	6,34	5,19			
			Paralela	0,843	6,34	5,19			
			Perpendicular	0,843	6,34	5,19			
	Vyr 37	5/32	Si	Si	Rectangular	Oblicua	0,878	5,37	5,99
						Paralela	0,878	5,37	5,99
						Perpendicular	0,878	5,37	5,99
					Triangular	Oblicua	0,878	5,37	5,99
						Paralela	0,878	5,37	5,99
						Perpendicular	0,878	5,37	5,99
Vyr 37	5/32	Si	Si	Rectangular	Oblicua	2,971	5,79	12,76	
					Paralela	2,971	5,79	12,76	
					Perpendicular	2,971	5,79	12,76	
				Triangular	Oblicua	2,971	5,79	12,76	
					Paralela	2,971	5,79	12,76	
					Perpendicular	2,971	5,79	12,76	

Los resultados con el criterio anterior ofrecen mayor número de modelos de aspersores. La variabilidad de velocidades de viento hace que igualmente, aún con este criterio tampoco sea definitivo para tomar decisiones sobre explotaciones reales. Se obtienen datos poco comparables, ya que las condiciones son distintas entre cada uno de los modelos ensayados.

Por tanto, es requisito necesario realizar ensayos simultáneos en campo donde se puedan comparar en condiciones iguales los distintos modelos de aspersores potencialmente viables para el riego en baja presión. Para ello, se contó con todas las marcas en convenio de colaboración y para experimentación tanto para evaluaciones de campo en condiciones iguales como sobre ensayos durante toda una campaña de cultivo con evaluaciones periódicas.

Como se ha podido apreciar, uno de los requisitos imprescindibles para el uso de los resultados de los ensayos del banco de aspersores es disponer de toda la información clasificada e informatizada en una base de datos. Esto permite realizar un análisis inmediato a la vez que precisar y simplificar un estudio en campo posterior.

Por tanto, el estudio de los casos obtenidos del banco de ensayo es válido sólo en el caso de que se disponga de información de las situaciones simuladas en las condiciones de velocidad de viento. En este caso, sólo podemos contar con la viabilidad para la baja presión de los modelos resultantes, pero no obtener la comparativa sobre la aptitud de cada uno de ellos al no tener condiciones de ensayo similares. Por todo, es necesario proceder al análisis del apartado siguiente.

4.2. RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES COMPLEMENTARIAS

En la línea de hacer uso de los de los datos obtenidos de la base de datos, está la de hacer estudios específicos in situ. Para el presente estudio sobre el riego por aspersión a baja presión, seguimos las dos líneas de ensayos propuestas.

4.2.1. Resultados de evaluaciones múltiples simultáneas en campo

Para completar los datos obtenidos de la base de datos se realizaron estudios de campo específicos in situ. Para el presente estudio sobre el riego por aspersión a baja presión seguimos las dos líneas de ensayos descritas en el apartado 4.2.6.

Cada empresa aportó tres modelos de aspersores para ser evaluados, los cuales se detallan por modelo y boquilla en la Tabla 18. El criterio de elección fue acordado de manera bilateral con cada empresa.

Tabla 18. Relación de modelos de aspersores a ensayar en evaluación múltiple.

FABRICANTE	MODELO	Boquilla 1 ^a	Boquilla 2 ^a	Criterio de selección
NaanDanJain	6025 SD	3,50	-	Resultado del banco
NaanDanJain	5035 SD	3,50	2,50	Elegido por el fabricante
NaanDanJain	5035 SD	4,00	2,50	Elegido por el fabricante
Nelson	R2000	3,60	-	Resultado del banco
Nelson	R2000	4,00	-	Resultado del banco
Netafim	D-NET™ 9575	3,57	2,50	Elegido por el fabricante
Unirain	F46	3,57	-	Resultado del banco
Unirain	F46	3,57	2,38	Resultado del banco
Unirain	F46	3,97	2,38	Resultado del banco
Vyrsa	Vyr 36	3,57	2,38	Resultado del banco
Vyrsa	Vyr 36 V. Esp.	3,57	2,38	Resultado del banco
Vyrsa	Vyr 37	3,97	2,38	Elegido por el fabricante

El objetivo de la evaluación era comprobar la viabilidad de los aspersores resultantes en presión de 200 y 250 kPa. Por tanto, se desarrollaron ensayos con las distintas condiciones de presión y similares condiciones de viento.

El primer día de evaluación no se contó con condiciones de vientos favorables a pesar de las previsiones ofrecidas días antes y por tanto se obtuvo de manera adicional resultados de una evaluación no perseguida, con viento fuerte. A partir de ahí se hicieron otras dos evaluaciones con viento débil en las dos presiones indicadas. Por consiguiente, los resultados obtenidos fueron con relación a:

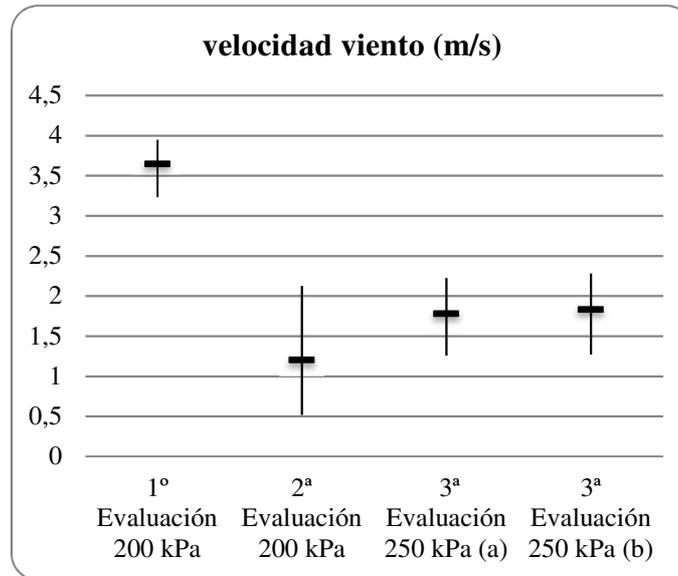
- 1^a Evaluación: A 200 kPa de presión y viento fuerte superiores a 3,5 m/s
- 2^a Evaluación: A 200 kPa con viento leve inferior a 2 m/s
- 3^o Evaluación: A 250 kPa con viento leve inferior a 2 m/s

En la tabla 11 del apartado 3.2.6.1 se detallaron todas las características de cada ensayo (fabricante, modelo de aspersor, diámetro de boquillas, parcela, fechas, horario y duración). A continuación, en la tabla 19 se detallan los valores medios horarios de velocidad y dirección de viento referente a los momentos de las evaluaciones.

Tabla 19. Datos de viento medios horarios recogidos en la estación agroclimática situada en la zona regable de la prueba.

HoraMin	Fecha	Vel viento (m/s)	Dir Viento (º)
9:30	30/08/2016	3,229	223
10:00	30/08/2016	3,612	223,6
10:30	30/08/2016	3,594	216,1
11:00	30/08/2016	3,868	215,2
11:30	30/08/2016	3,95	218,8
12:00	30/08/2016	4,138	235,8
12:30	30/08/2016	4,073	238,3
6:00	01/09/2016	0,519	67,74
6:30	01/09/2016	1,108	58,34
7:00	01/09/2016	0,951	54,48
7:30	01/09/2016	0,938	76,8
8:00	01/09/2016	1,138	56,94
8:30	01/09/2016	1,655	47,03
9:00	01/09/2016	2,123	43,41
11:00	01/09/2016	1,268	47,8
11:30	01/09/2016	1,793	351,7
12:00	01/09/2016	1,741	0,636
12:30	01/09/2016	2,09	16,21
13:00	01/09/2016	2,281	1,64
7:30	02/09/2016	0,901	66,5
8:00	02/09/2016	1,257	72,5
8:30	02/09/2016	1,614	66,05
9:00	02/09/2016	1,723	41,35
9:30	02/09/2016	2,182	34,81
10:00	02/09/2016	2,181	40,83
10:30	02/09/2016	2,224	43,08
11:00	02/09/2016	1,956	72,6
11:30	02/09/2016	1,815	50,17
12:00	02/09/2016	1,619	57,39
12:30	02/09/2016	1,468	26,78
13:00	02/09/2016	1,58	7,75

En la figura 54, se representan los valores de viento máximo, mínimo y medio recogidos para cada evaluación. La dirección del viento predominante fue siempre paralela a los ramales de riego.



(a) Condiciones de viento correspondientes a 3ª evaluación del 1/09/2016
 (b) Condiciones de viento correspondientes a 3ª evaluación del 2/09/2016

Figura 54. Gráfica de valores medios y rangos de variación de las velocidades de viento durante cada una de las evaluaciones múltiples.

Una vez obtenidos los datos de viento y ejecutadas las evaluaciones, se procedió al cálculo de UD para cada uno de los aspersores ensayados. Para preservar la confidencialidad con las empresas fabricantes y distribuidoras de aspersores se indican los resultados sin identificar los modelos de cada uno de ellos en dichos resultados. Y por tanto quedarán referenciados con un número que no atiende a ningún criterio funcional ni de ningún tipo de orden.

A continuación, se detallan en las tablas siguientes el resumen de resultados de Uniformidad de Distribución de cada evaluación y las condiciones de viento medio en las que se hicieron. Además, se ilustran los resultados con gráficas tridimensionales de los valores recogidos en los pluviómetros.

La tabla 20 muestra los resultados de Uniformidad de Distribución y la distribución de lluvia de los aspersores evaluados en las tres evaluaciones múltiples. En ella se muestran gráficamente los volúmenes de agua recogidos en cada punto de la zona de evaluación entre 5 aspersores, dado que el marco en todos ellos es de 12x15 triangular. Los colores representados son relativos al orden de dimensiones representadas en la escala de colores de la tabla.

Tabla 20. Uniformidad de Distribución y Coeficiente de Uniformidad de Christiansen por modelo de aspersor.

Modelo de aspersor	Evaluación	Presión (kPa)	Distancias entre aspersores	Distancia entre ramales	Boquilla principal	Boquilla secundaria	UD	CU
1	1ª	200	12	15	3,50	2,50	52%	70%
	2ª	200	12	15	3,50	2,50	80%	87%
	3ª	250	12	15	3,50	2,50	77%	86%
2	1ª	200	12	15	4,00	2,50	54%	71%
	2ª	200	12	15	4,00	2,50	79%	87%
	3ª	250	12	15	4,00	2,50	83%	89%
3	1ª	200	12	15	3,50		67%	79%
	2ª	200	12	15	3,50		70%	81%
	3ª	250	12	15	3,50		68%	80%
4	1ª	200	12	15	3,57	2,38	39%	62%
	2ª	200	12	15	3,57	2,38	68%	80%
	3ª	250	12	15	3,57	2,38	63%	77%
5	1ª	200	12	15	3,60		43%	64%
	2ª	200	12	15	3,60		68%	80%
	3ª	250	12	15	3,60		76%	85%
6	1ª	200	12	15	4,00		52%	70%
	2ª	200	12	15	4,00		73%	83%
	3ª	250	12	15	4,00		74%	84%
7	1ª	200	12	15	3,50		51%	69%
	2ª	200	12	15	3,50		66%	79%
	3ª	250	12	15	3,50		61%	75%
8	1ª	200	12	15	3,57	2,38	37%	60%
	2ª	200	12	15	3,57	2,38	62%	76%
	3ª	250	12	15	3,57	2,38	70%	81%
9	1ª	200	12	15	3,97	2,38	38%	61%
	2ª	200	12	15	3,97	2,38	74%	83%
	3ª	250	12	15	3,97	2,38	76%	85%
10	1ª	200	12	15	3,57	2,38	33%	58%
	2ª	200	12	15	3,57	2,38	59%	74%
	3ª	250	12	15	3,57	2,38	82%	89%
11	1ª	200	12	15	3,57	2,38	44%	65%
	2ª	200	12	15	3,57	2,38	67%	79%
	3ª	250	12	15	3,57	2,38	77%	86%
12	1ª	200	12	15	3,97	2,38	63%	76%
	2ª	200	12	15	3,97	2,38	66%	79%
	3ª	250	12	15	3,97	2,38	70%	81%

En la figura 55 se representan las UD en las distintas condiciones para cada uno de los modelos de aspersor.

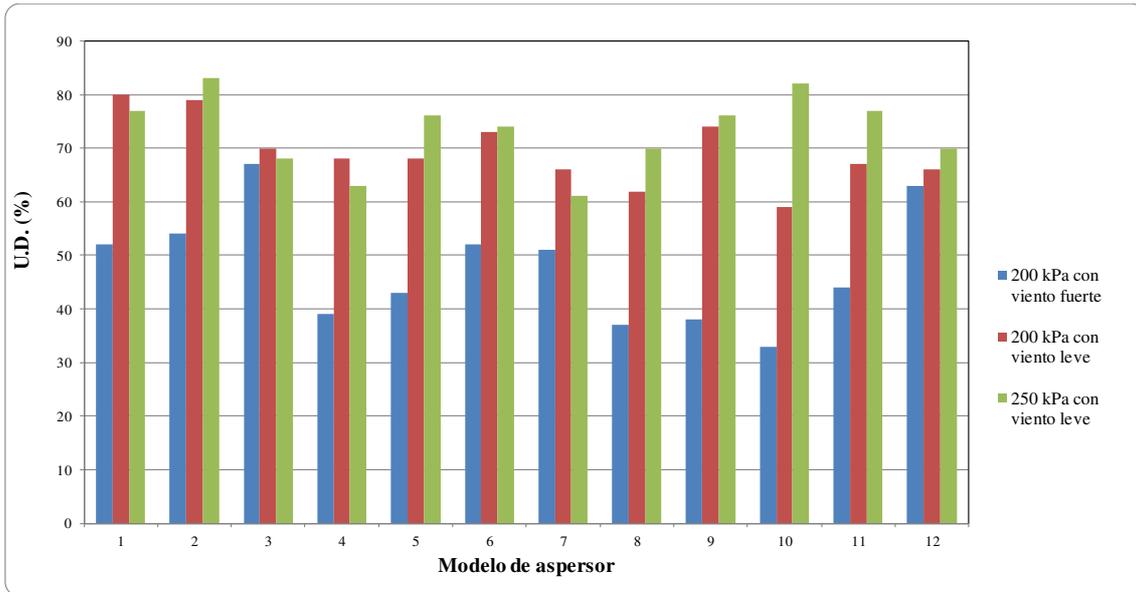
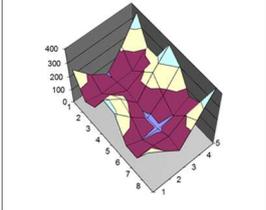
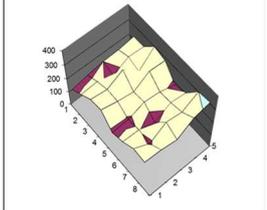
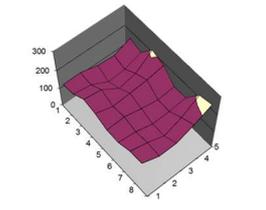
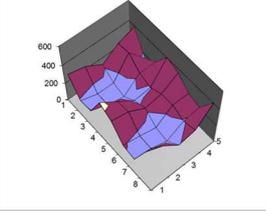
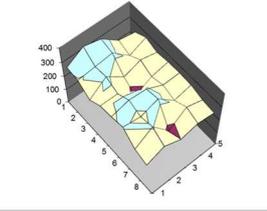
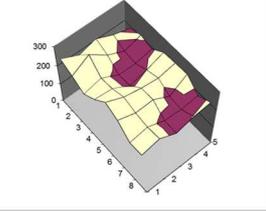
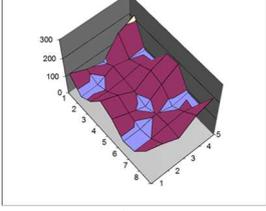
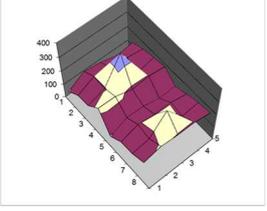
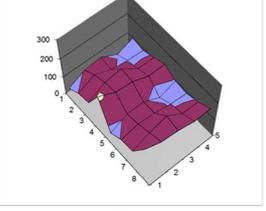
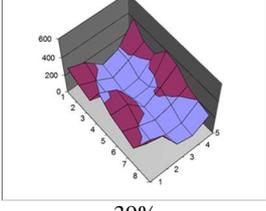
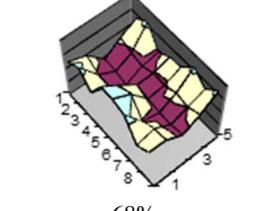
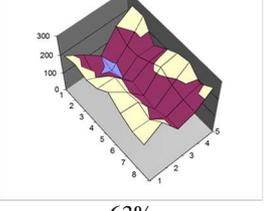
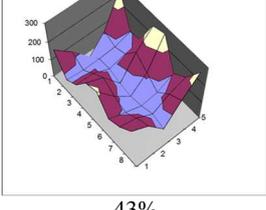
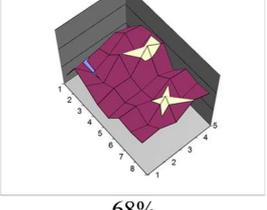
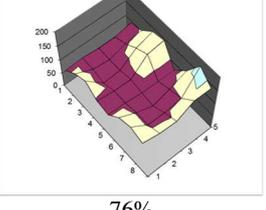
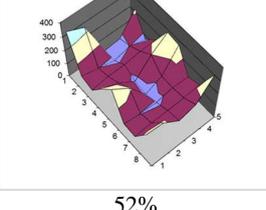
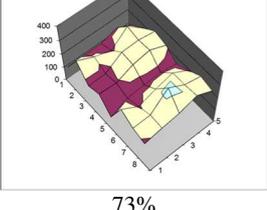
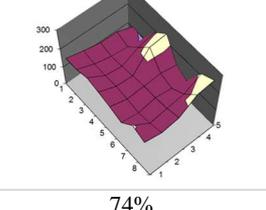


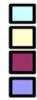
Figura 55. Gráfica de U.D. de cada uno de los aspersores en las tres condiciones de presión y viento ensayados.

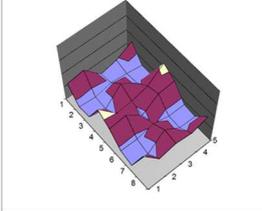
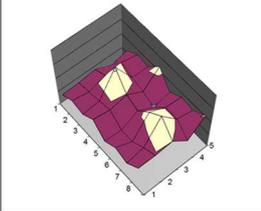
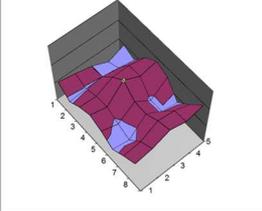
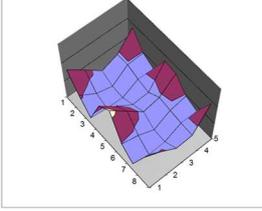
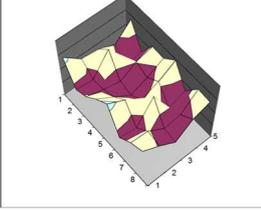
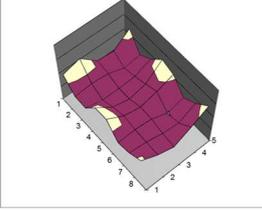
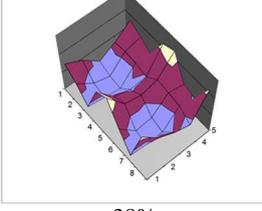
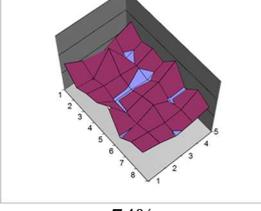
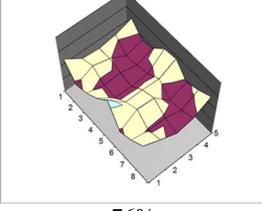
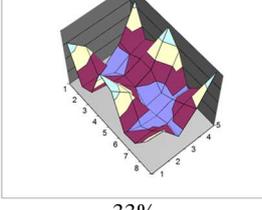
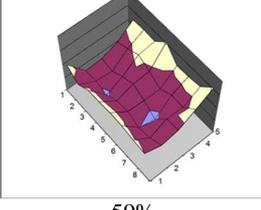
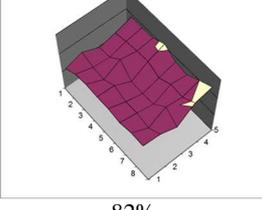
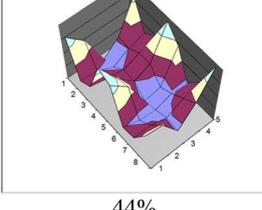
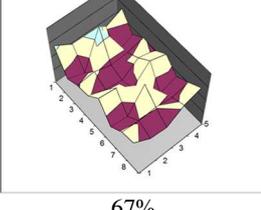
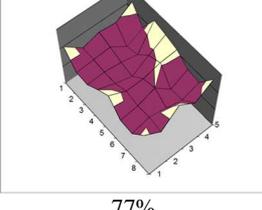
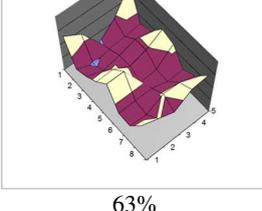
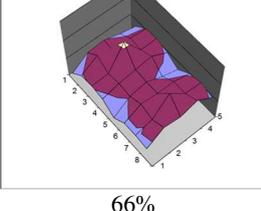
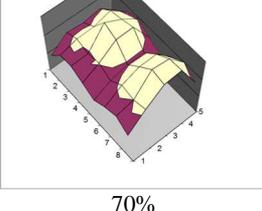
En esta figura se puede apreciar los valores de UD comparados para cada presión y situación de viento. Todos los modelos ensayados son aptos para situaciones de baja presión, con mayores o menores cualidades en determinadas condiciones de viento. La situación de viento fuerte se debe evitar en la práctica (se recomienda no regar con valores de velocidad de viento superiores a 3,5 m/s), y en situaciones de presiones convencionales con más razón, pues las uniformidades serán más bajas.

La tabla 21 muestra los resultados de Uniformidad de Distribución y la distribución de lluvia de los aspersores evaluados en las tres evaluaciones múltiples. En ella se muestra gráficamente los volúmenes de agua recogido en cada punto de la zona de evaluación entre 5 aspersores, dado que el marco en todos ellos es triangular de 12x15. Los colores representados son relativos a los volúmenes recogidos por los pluviómetros y en el orden dimensión se encuentra representado en la leyenda de la tabla.

Tabla 21. Resultados del patrón de distribución de lluvia y Uniformidad de Distribución de los aspersores evaluados en las tres evaluaciones múltiples.

MODELO DE ASPERSOR	200 kPa con viento fuerte (3,6 m/s)	200 kPa con viento leve (1,2 m/s)	250 kPa con viento leve(1,8 m/s)
1	 52%	 80%	 77%
2	 54%	 79%	 83%
3	 67%	 70%	 68%
4	 39%	 68%	 63%
5	 43%	 68%	 76%
6	 52%	 73%	 74%



MODELO DE ASPERSOR		200 kPa con viento fuerte (3,6 m/s)	200 kPa con viento leve (1,2 m/s)	250 kPa con viento leve(1,8 m/s)
7		 <p>51%</p>	 <p>66%</p>	 <p>61%</p>
8		 <p>37%</p>	 <p>62%</p>	 <p>70%</p>
9		 <p>38%</p>	 <p>74%</p>	 <p>76%</p>
10		 <p>33%</p>	 <p>59%</p>	 <p>82%</p>
11		 <p>44%</p>	 <p>67%</p>	 <p>77%</p>
12		 <p>63%</p>	 <p>66%</p>	 <p>70%</p>

Los resultados representados en la tabla 21 se resumen en la figura 56.

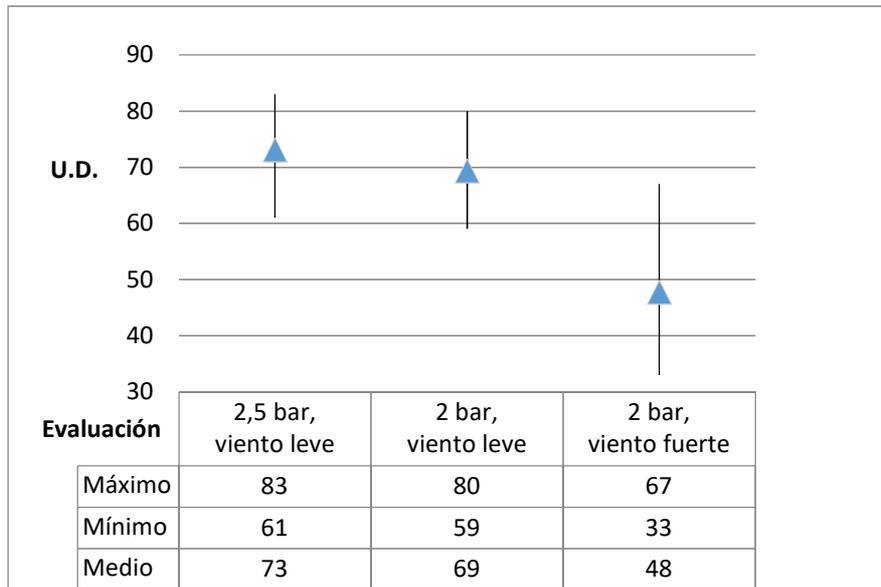


Figura 56. Representación de los valores medios de Uniformidad de Distribución y la horquilla de variación de los doce modelos ensayados en cada prueba.

A 250 y 200 kPa de presión y velocidad de viento se obtienen valores de UD por encima del 75% (uniformidad aceptable). Por tanto, es posible la baja presión en condiciones normales de viento. Sin embargo, a 200 kPa y viento fuerte, se obtienen unos valores bajos de UD, afectados por velocidades de vientos superiores a 3,5 m/s, dónde en ningún caso se debe de regar.

Para los datos de UD representados en las evaluaciones de 250 y 200 kPa se dispone de un rango similar de resultados, quizás con un ligero nivel superior de 250 kPa en el conjunto de los resultados. A tales efectos y dependiendo del modelo del aspersor que se coja, podemos decir también que bajar la presión a 200 kPa es una meta alcanzable y con mayor ahorro energético en cualquier red de riego dónde se incluya estas condiciones.

El conjunto de evaluaciones realizadas en este estudio tenía como propósito corroborar en condiciones reales de funcionamiento los resultados de los estudios realizados en el banco de ensayos de aspersores con viento. Si se compara los datos obtenidos en campo (figura 56) con los obtenidos en el banco de ensayo para unas condiciones similares (figura 52) los datos son coincidentes, en tanto que, siendo las muestras de ambos conjuntos distintas, esta valoración es correcta. Esto es debido a que los datos representados del banco son curvas de regresión de los resultados que incluirían sin ninguna desviación los datos puntuales obtenidos en campo.

Por tanto, se confirma la funcionalidad del banco de ensayos como información prospectiva para futuros diseños de riego por aspersión y para diferentes condiciones de trabajo.

Sin embargo, este estudio ha posibilitado hacer una selección de aquellos aspersores con mejor comportamiento en campo, como fase previa de un proyecto más general, y orientado a la transición del riego a la baja presión.

Los resultados obtenidos en estas evaluaciones no representan resultados definitivos del comportamiento de cada uno de los aspersores ensayados, pues las condiciones de las evaluaciones son muy concretas y están dentro de las múltiples condiciones que se pueden dar durante toda una campaña de riego. Es decir, factores como: tiempo de riego, variabilidad de las condiciones de viento sobre cada riego, etc., hacen que todavía quede pendiente un estudio real más amplio sobre la viabilidad del riego a baja presión. Por ello, en la fase final de este trabajo se abordará el estudio del comportamiento de cada aspersor en campo durante toda una campaña de riego y su posible influencia en la producción con respecto a un sistema de riego a presión convencional.

4.2.2. Resultados de evaluaciones sobre una campaña de riego en el cultivo de remolacha azucarera.

Las evaluaciones de los aspersores en baja presión sobre toda una campaña de riego y sobre un cultivo dieron como resultado datos de uniformidad de riego que se fueron comparando con el sistema más representativo de la comarca en condiciones de presión convencional. En la figura 57 se ilustran las dos zonas estudiadas en cada parcela piloto. Por un lado, la de presión convencional con la zona de evaluación del agricultor, y por otro la de evaluación de baja presión. De ambas zonas se ejecutó la misma programación de riego en dosis y frecuencia y se hizo el seguimiento de las uniformidades de riego y la producción.

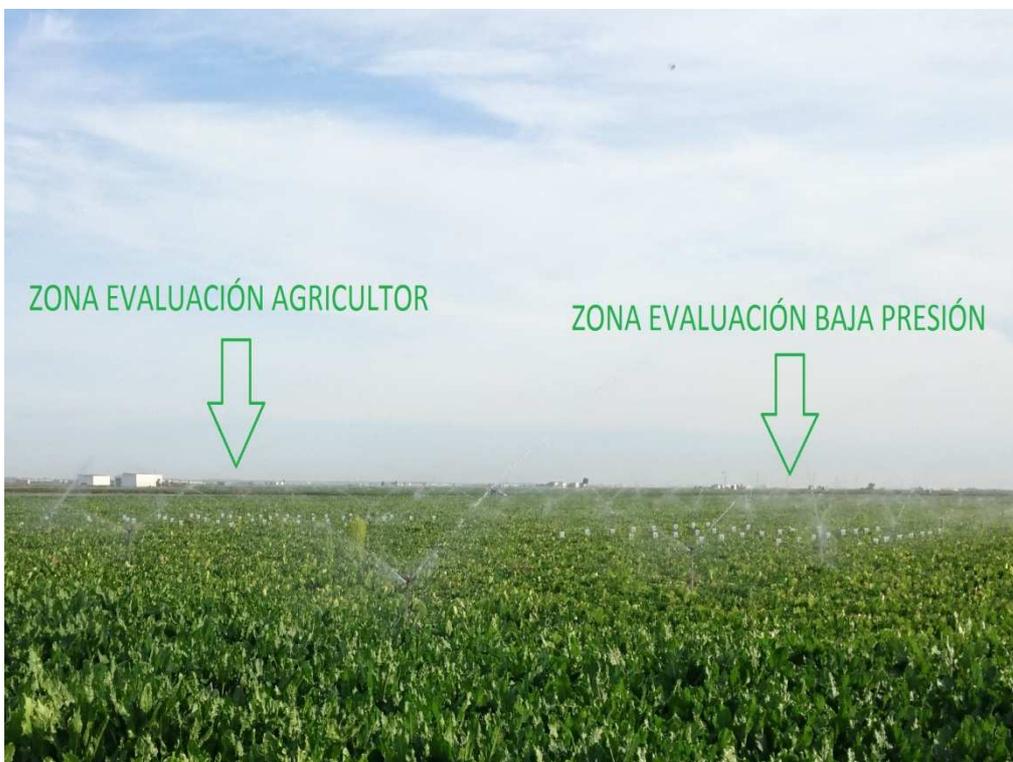


Figura 57. Zonas de evaluaciones con los pluviómetros permanentes.

- **Cantidad de Agua recibida.**

Los riegos realizados en cada parcela han dependido de la programación de riego de cada agricultor, siempre dotando la misma cantidad de agua en ambas zonas (presión normal y baja presión) con tiempo de riego diferente en función del caudal del aspersor. Los datos totales que conciernen al balance hídrico del cultivo por parcela se detallan en la tabla 22.

Tabla 22. Registro de láminas de agua (mm) acumuladas en el balance hídrico por parcela.

Parcela	C-2059	C-2064	C-2065	C-2071
Precipitación (mm)	167,1	167,1	167,1	167,1
Riego agricultor (mm)	415,9	448,4	319,2	487,3
Riego baja presión (mm)	416,1	448,2	318,9	490,7
Consumo (mm)	520,8	556,2	455,3	552,3

El aporte de agua total se ha repartido en un número de riegos variables, dependiendo del agricultor y la fecha de recolección. A continuación, en las tablas 23 a 26 se detallan los riegos realizados por fechas en la campaña de riego.

Tabla 23. Datos de riegos de la parcela C-2059 y fecha de recolección.

C-2059				
Riegos	Fecha	Riego agricultor (mm)	Riego baja presión (mm)	Fecha de recolección
1	16/03/2017	17,6	17,6	3/07/2017
2	05/04/2017	30,3	30,3	
3	12/04/2017	28,1	28,0	
4	19/04/2017	40,8	40,8	
5	26/04/2017	34,5	34,5	
6	05/05/2017	25,3	25,3	
7	17/05/2017	30,3	30,2	
8	23/05/2017	30,8	31,0	
9	29/05/2017	40,5	40,4	
10	06/06/2017	34,8	34,8	
11	14/06/2017	37,4	37,5	
12	19/06/2017	34,6	34,8	
13	26/06/2017	30,9	30,9	

Tabla 24. Datos de riegos de la parcela C-2064 y fecha de recolección.

C-2064				
Riegos	Fecha	Riego agricultor (mm)	Riego. baja presión (mm)	Fecha de recolección
1	21/03/2017	24,0	24,0	14/07/2017
2	03/04/2017	26,3	26,2	
3	10/04/2017	31,1	31,2	
4	17/04/2017	40,2	40,2	
5	26/04/2017	30,1	30,1	
6	08/05/2017	34,4	34,3	
7	19/05/2017	30,8	30,8	
8	26/05/2017	36,6	36,7	
9	02/06/2017	32,3	32,4	
10	08/06/2017	30,6	30,6	
11	15/06/2017	34,4	34,4	
12	22/06/2017	31,3	31,2	
13	29/06/2017	30,8	30,8	
14	06/07/2017	35,4	35,3	

Tabla 25. Datos de riegos de la parcela C-2065 y fecha de recolección.

C-2065				
Riegos	Fecha	Riego. agricultor (mm)	Riego baja presión (mm)	Fecha de recolección
1	25/02/2017	21,4	21,4	16/06/2017
2	16/03/2017	27,3	27,2	
3	04/04/2017	28,4	28,4	
4	11/04/2017	27,6	27,3	
5	19/04/2017	43,2	43,2	
6	25/04/2017	27,0	26,8	
7	06/05/2017	32,8	33,5	
8	18/05/2017	33,6	33,4	
9	23/05/2017	39,6	39,6	
10	31/05/2017	38,2	38,1	

Tabla 26. Datos de riegos de la parcela C-2071 y fecha de recolección.

C-2071				
Riegos	Fecha	Riego agricultor (mm)	Riego baja presión (mm)	Fecha de recolección
1	01/03/2017	20,8	20,7	
2	17/03/2017	25,4	25,4	
3	04/04/2017	26,6	26,5	
4	11/04/2017	34,1	35,1	
5	14/04/2017	15,1	16,1	
6	18/04/2017	37,2	38,4	
7	25/04/2017	41,3	41,0	
8	05/05/2017	25,3	25,0	
9	17/05/2017	35,3	35,4	
10	23/05/2017	32,3	33,0	
11	29/05/2017	35,6	35,6	
12	05/06/2017	35,2	35,2	
13	12/06/2017	33,9	34,1	
14	19/06/2017	30,7	30,7	
15	26/06/2017	33,4	33,4	
16	03/07/2017	25,1	25,2	12/07/2017

- **Evaluaciones de Riego.**

Las evaluaciones de riego se realizaron en el periodo de febrero a mayo, realizando 3 evaluaciones dobles por parcela (Zonas de Evaluación del Agricultor y Baja Presión). Todas las evaluaciones se han realizado según el Procedimiento para la realización de evaluaciones de riego por aspersión del Servicio de Asesoramiento al Regante de la Junta de Andalucía.

Los resultados de uniformidad corresponden a una misma zona representativa en todas las parcelas. En la tabla 27 se detallan los resultados de las distintas evaluaciones.

Tabla 27. Evaluaciones realizadas por parcela.

Parcela	Evaluación	Fecha	Agricultor					Baja Presión				
			Duración (min)	Presión (kPa)	VV m (m/s)	UD (%)	CU (%)	Duración (min)	Presión (kPa)	VVm (m/s)	UD (%)	CU (%)
C-2059	1ª	16/03/2017	157	290	2,2	71	82	116	200	2,2	60	75
	2ª	05/04/2017	198	290	1,3	79	87	193	200	1,3	73	83
	3ª	12/04/2017	230	270	0,9	73	83	225	200	0,9	83	89
C-2064	1ª	04/04/2017	210	300	1,7	81	88	210	210	1,7	87	92
	2ª	10/04/2017	287	290	1,7	75	84	286	200	1,7	78	86
	3ª	17/04/2017	305	290	1,5	76	85	310	200	1,5	87	92
C-2065	1ª	25/02/2017	275	260	2,1	78	86	308	200	2,2	76	85
	2ª	25/04/2017	161	270	3,8	62	76	161	210	3,8	67	79
	3ª	06/05/2017	420	270	1,2	76	85	410	200	1,2	75	84
C-2071	1ª	04/04/2017	150	320	2,5	68	80	150	200	2,5	68	80
	2ª	05/05/2017	286	310	4,2	62	76	286	200	4,2	62	76
	3ª	17/05/2017	292	290	1,1	70	81	293	200	1,1	79	87

NOTAS.- VVm.- velocidad del viento media

En la figura 58 se representan las Uniformidades de Distribución del Agricultor y Baja Presión.

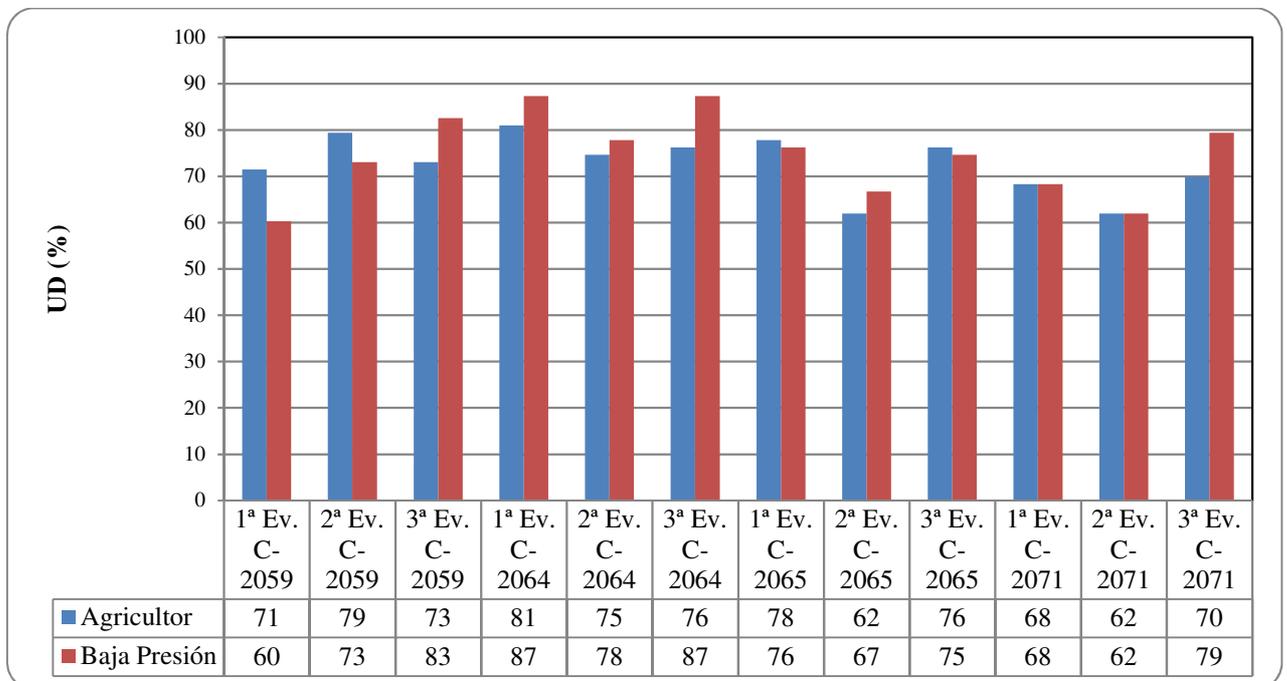


Figura 58. Resultados de las UD en las zonas Agricultor y Baja Presión.

En la tabla 28, se exponen los resultados medios del Coeficiente de Uniformidad de Christiansen con el objetivo de ofrecer al sector valores de uniformidad de riego estándares en aspersión de las evaluaciones realizadas.

Tabla 28. Resultados medios del CU (%) en las evaluaciones realizadas.

	C-2059	C-2064	C-2065	C-2071
Agricultor	84	86	82	79
Baja Presión	82	90	83	81
Coef. Var. (%)	5,79	2,03	2,67	3,06
Significación	0,18 NS	8,89 NS	0,06 NS	1,00 NS

NS: no significativo, según test LSD, a $p=0,05$

En ningún caso se han producido diferencias significativas en el CU, siendo las medias superiores al 80% en Baja Presión, que se consideran aptas para el riego por aspersión en la Remolacha Azucarera.

Con los datos anteriores de UD se ha generado líneas de tendencias independientes para cada presión en relación al viento, y se ha obtenido las gráficas de la figura 59.

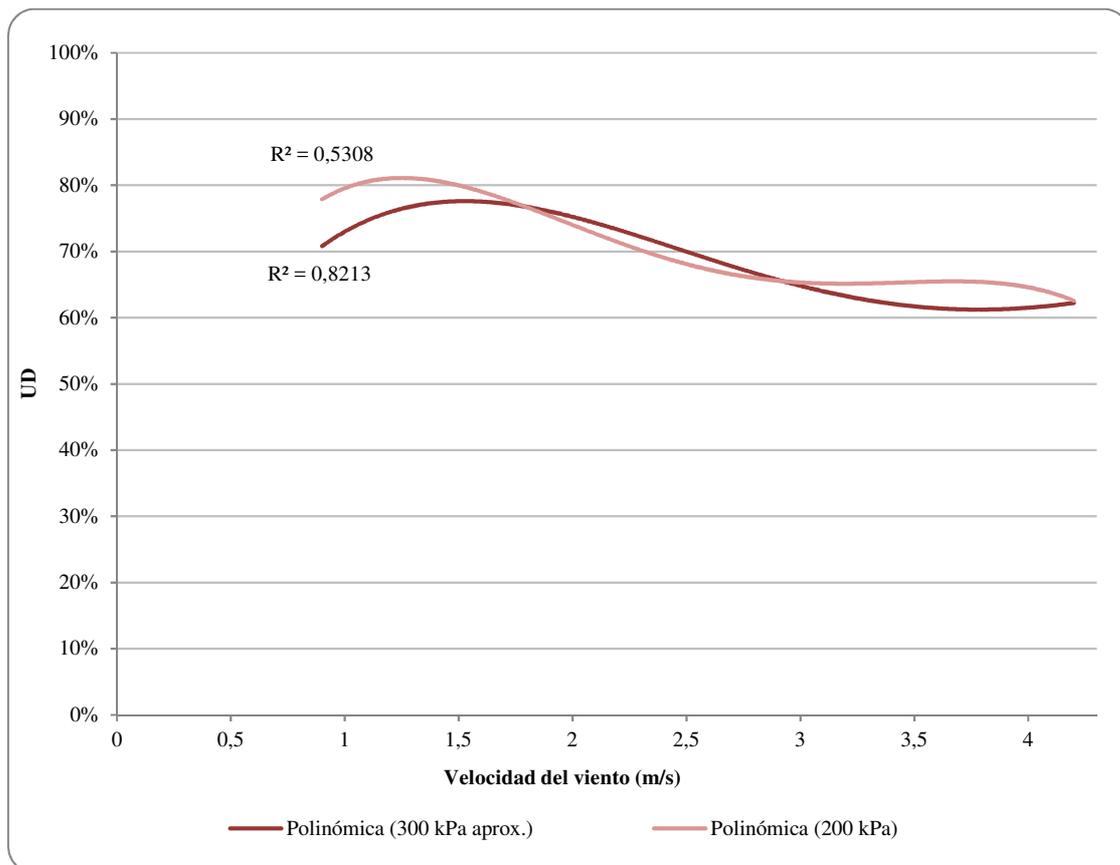


Figura 59. Gráficas de las líneas de tendencia de los datos de UD en relación a la velocidad del viento y para los dos valores de presiones ensayadas en campo en la campaña de riego.

Si estos datos son comparados con los de la figura 52, fruto de los resultados del conjunto de los aspersores analizados en el banco de ensayo de riego, se obtienen curvas idénticas para la presión de 200 kPa y con una variabilidad similar. Sin embargo, para la presión de 300 kPa en la figura 52, se obtiene una curva intermedia entre la de 250 y 350 kPa y con una variabilidad menor (R^2 de 0,8213). Por tanto, y para una muestra de aspersores menor a la incluida en el estudio con el banco, los resultados obtenidos en evaluaciones de campo confirman el comportamiento ofrecido previamente por el estudio realizado con el banco de aspersores.

- **Resultados del rendimiento y la calidad.**

Para el análisis de rendimiento y calidad de la Remolacha de cada zona de riego (Agricultor y Baja Presión), se tomaron 10 muestras de 6 m². Los resultados de producción (rendimiento de recolección de remolacha, polarización, azúcar obtenida, Índice Económico del Agricultor –IEA- y pureza) en los distintos ensayos se muestran en las tablas 29, 30, 31 y 32.

Tabla 29. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2059.

C-2059					
Tratamiento	Remolacha (t/ha)	Polarización (%)	Azúcar (t/ha)	IEA (t/ha 16°)	Pureza (%)
Baja Presión	116,12	17,93	20,77	135,24	95,43
Agricultor	115,98	17,64	20,46	132,95	95,22
<i>Coef. Var. (%)</i>	7,08	3,2	5,12	5,04	0,22
<i>Significación</i>	0,00 NS	1,30 NS	0,44 NS	0,57 NS	4,95 NS

NS: no significativo, según test LSD a $p=0,05$.

En la parcela C-2059 no se han producido diferencias significativas en ninguno de los parámetros de rendimiento y calidad entre las zonas del aspersor convencional (agricultor) y de baja presión.

Tabla 30. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2064.

C-2064					
Tratamiento	Remolacha (t/ha)	Polarización (%)	Azúcar (t/ha)	IEA (t/ha 16°)	Pureza (%)
Baja Presión	110,53	16,14	17,83	111,86	93,34 b
Agricultor	112,28	16,43	18,43	116,48	93,78 a
<i>C. V. (%)</i>	5,22	3,3	4,12	4,39	0,3
<i>Significación</i>	0,45 NS	1,46 NS	3,20 NS	4,24 NS	12,64 **

NS: no significativo, **: significativo 1%, según test LSD a $p=0,05$.

En la parcela C-2064, los parámetros de peso, polarización, azúcar IEA no han tenido diferencias significativas entre las 2 zonas. Respecto a la pureza existen diferencias significativas al 1%, obteniendo mayor pureza la Zona Agricultor sin poder precisar el motivo.

Tabla 31. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2065.

C-2065					
Tratamiento	Remolacha (t/ha)	Polarización (%)	Azúcar (t/ha)	IEA (t/ha 16°)	Pureza (%)
Baja Presión	86,78	17,38	15,08	97,49	92,62
Agricultor	87,8	17,84	15,65	102,11	92,87
<i>Coef. Var. (%)</i>	4,24	2,88	4,24	4,7	0,85
<i>Significación</i>	0,38 NS	4,10 NS	3,88 NS	4,85 NS	0,50 NS

NS: no significativo, según test LSD a p=0,05.

En la parcela C-2065 no se han producido diferencias significativas en ninguno de los parámetros de rendimiento y calidad entre las zonas del aspersor convencional y de baja presión.

Tabla 32. Producciones y rendimientos obtenidos en las zonas de riego de la parcela C-2071.

C-2071					
Tratamiento	Remolacha (t/ha)	Polarización (%)	Ázucar (t/ha)	IEA (t/ha 16°)	Pureza (%)
Baja Presión	117,52	15,83	18,61	115,74	94,37 a
Agricultor	121,95	15,64	19,05	117,72	94,05 b
<i>Coef. Var. (%)</i>	6,42	1,99	5,65	5,45	0,31
<i>Significación</i>	1,66 NS	1,84 NS	0,89 NS	0,48 NS	6,17 *

NS: no significativo, *: significativo 5%, según test LSD a p=0,05.

En la parcela C-2071, los parámetros de peso, polarización, azúcar e Índice Económico del Agricultor (IEA) no han tenido diferencias significativas entre las 2 zonas. La zona de Baja Presión tiene un porcentaje de pureza significativamente superior a la zona Agricultor, sin poder precisar el motivo.

Finalmente, los resultados de estos ensayos y para el caso de la viabilidad en campo de uso de riego por aspersión en presiones bajas, se obtiene lo siguiente:

- Las evaluaciones de riego realizadas muestran que, en las condiciones analizadas, los aspersores de baja presión y presión normal han tenido repartos de agua muy similares. Los aspersores de baja presión han tenido un CU por encima del 80%. Este valor es considerado apto para el riego de remolacha azucarera.
- Los resultados de rendimientos son estadísticamente similares entre los aspersores convencionales y los de baja presión.
- En determinadas parcelas se han producido diferencias significativas de calidad respecto a pureza sin poder precisar el motivo de dicha diferencia entre ambas zonas.

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Los sistemas de riego por aspersión siempre han carecido de información sobre la uniformidad del riego de una manera completa y precisa, especialmente en condiciones de viento. Con el diseño de este prototipo de banco de pruebas automático, y gracias a la combinación de metodologías para el tratamiento de datos, superposición de diseños y simulación de múltiples direcciones de viento, una gran cantidad de información está disponible para cada uno de los aspersores probados. Además, los datos obtenidos para un aspersor aislado pueden utilizarse para simular múltiples escenarios, calculando la uniformidad del riego para diferentes diseños. Además del tratamiento individualizado de la información, los estudios de conjuntos de datos pueden abordar problemas de características determinadas mediante modelos de análisis de regresión lineal múltiple.

La investigación desarrollada en torno a la caracterización de funcionamiento de los aspersores y sus resultados obtiene múltiples conclusiones en función a la fase del trabajo desarrolla en la Tesis. De esta manera, se tienen en cuenta aquellas conclusiones relacionadas con: el funcionamiento del banco de ensayo automático con viento, resultado de los ensayos de aspersores y finalmente el estudio del riego por aspersión con baja presión.

5.1. FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE ENSAYO AUTOMÁTICO DE ASPERSORES CON VIENTO.

- La puesta en marcha del banco ha generado múltiples resultados de ensayos de manera automatizada, con una intervención mínima durante cualquier jornada de funcionamiento.
- El funcionamiento del banco requiere de una metodología de uso bien protocolizada, en cuanto al tratamiento de los datos, labores de mantenimiento y calibración ya descritas, pues esto redundará en una agilidad, precisión y alta eficiencia a la hora de disponer de resultados finales.
- Los datos resultantes de cada ensayo del aspersor evaluado son valores precisos en relación con la acción del viento. Por un lado, se obtienen valores en continuo de la velocidad y dirección del viento, y por otro el análisis posterior de estabilidad de estas variables asegura la relación directa entre uniformidad del riego y la influencia del viento. Por tanto, el sistema de evaluación es completamente distinto a la metodología tradicional, dónde los datos de uniformidad de riego están vinculados sólo a tres medidas de viento a lo largo de una prueba (al inicio, durante la prueba y al final) con la imprecisión que supone para el estudio de la relación viento y uniformidad de riego.

5.2. RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE ASPERSORES

- Los resultados obtenidos en el conjunto de situaciones ensayadas han proporcionado una gran cantidad de información para analizar la mayoría de las situaciones existentes en campo. Esto nos permite valorar la uniformidad del riego y contemplar todas las

posibilidades de mejora con los criterios que se estimen oportunos. Aun así, quedan dos líneas de trabajo para llegar al fin propuesto:

- La continuación del trabajo permitirá completar aquellas situaciones no ensayadas y que se asemejarán a determinadas situaciones planteadas en esta primera fase.
 - El análisis del conjunto de resultados se ha gestionado con una base de datos en Access que permite hacer consultas a usuarios experimentados. Pero se requerirá a nivel transferencia de una herramienta ágil que permita a los técnicos y usuarios de riego por aspersión y través de un asistente recibir la información particularizada para la optimización de la uniformidad de riego.
- La capacidad del banco de generar muchos resultados y clasificarlos en un diseño óptimo de base de datos permite realizar estudios a distintas escalas de agrupamiento y con distintos niveles de análisis.
 - Con la herramienta de regresión lineal múltiple y para todas las variables que influyen en la uniformidad de riego, se pueden analizar distintos grupos de aspersores y determinar las fortalezas y debilidades de cada grupo escogido. En tales casos se ha obtenido de manera general, que:
 - La uniformidad del riego en los aspersores rotativos varía menos con la presión que en los de impacto.
 - Para aspersores rotativos la uniformidad de riego es más sensible que en los aspersores de impacto.
 - La uniformidad del riego en los aspersores rotativos es ligeramente más sensible en lo concerniente a: la disposición del marco, a la distancia entre ramales y aspersores, y a la dirección del viento.
 - Para los aspersores de impacto con o sin viento, y desde el punto de vista de la uniformidad de riego, se obtiene que ciertas variables (doble boquilla, disposición triangular y la menor distancia entre ramales y aspersores) influyen algo más que la presión de trabajo.
 - Cuando el análisis va dirigido a casos concretos y en relación a una sola variable las herramientas de análisis son más deterministas y más simples, como es el caso regresión lineal simple.
 - Y finalmente uno de los objetivos de base de datos de resultados de ensayo de aspersores debería ser la capacidad de simular la uniformidad de riego por aspersión de cualquier situación concreta

5.3. ESTUDIO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN CON BAJA PRESIÓN.

- Para el estudio de la transición a la baja presión del riego por aspersión o para cualquier estudio donde intervenga el riego por aspersión, se ha dispuesto de una metodología amplia y herramientas suficientes para hacer efectivos los resultados que se obtienen.
- La metodología de estudio utilizada ha sido completa, llegando a comprobar el efecto sobre un cultivo regado con baja presión; sin embargo, se podrán obtener resultados en cualquiera de los pasos previos, que serán válidos en función del nivel de transferencia al sector al que se quiera llegar.
 - Es esencial disponer de los resultados ya clasificados en una base de datos que nos permitan consultas ágiles en relación a las situaciones reales de las que queremos conocer la calidad del riego.
 - Una base de datos amplia permitirá además hacer estudios de conjunto y analizar las influencias de las variables que intervienen en los distintos grupos de resultados.
 - Igualmente, datos concretos ya seleccionados y comprobados en el banco podrá ser contrastada en una situación real y antes de ser adoptada en un proyecto de riego a gran escala
- Existe la posibilidad de bajar la presión de funcionamiento para los sistemas de riego por aspersión. No siendo excluyente el material no ensayado, dado que este podrá ser evaluado por el banco e incluido en la base de datos obtenida.
- Los resultados obtenidos son el primer paso para una transición del riego a baja presión del riego en comunidades de regantes. Esto podría suponer un menor consumo de energía y menores valores de potencias contratadas, lo que repercutiría directamente en un gran ahorro para el agricultor. En otros sistemas de riego, conseguir requerimientos más bajos de presión es posible, como en riego localizado. Por tanto, será viable. El proceso de transición a la baja presión en redes colectivas de riego. Para ello, deberá ser estudiado a niveles de políticas de gestión de comunidades de usuarios del agua. Una fórmula previa podrá ser la incentivación con menor coste del agua en los consumos con menor requerimiento de presión. Estas fases de transición deberán ser motivo de estudios específicos que contemplen análisis de redes colectivas de riego.

El estudio concreto de riego a baja presión sirve para ilustrar lo útil y eficaz que es el banco de aspersión automatizado, convirtiéndose en una herramienta muy eficiente para solucionar el problema de la uniformidad en los sistemas de riego por aspersión a todas las escalas, desde un nivel colectivo hasta asesoramiento de mejora sobre parcelas concretas. Igualmente, con la información ya generada se dispone de capacidad para realizar un asesoramiento al regante específico de cada caso, manteniendo o mejorando la uniformidad del riego y posibilitando un ahorro energético.

5.4. POSIBLES LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA

Ante la potencialidad del banco automático de ensayos con viento en riego por aspersión para generar resultados de riego por aspersión, es muy oportuno ampliar las dos grandes líneas iniciadas en esta tesis: el uso eficiente del agua, como recurso escaso, y el ahorro energético en la lucha contra el cambio climático. Confluyendo a su vez y respectivamente en la reducción de la huella hídrica y de carbono de los productos regados.

Por todo, es necesario activar los agentes involucrados relacionados con el riego como:

- La participación de los propios fabricantes de emisores de riego, quienes serán rápidamente beneficiados en innovación sobre las condiciones de uso de sus emisores actuales o incluso diseñar otros nuevos. La primera consecuencia de estos desarrollos será un mejor posicionamiento con respecto a la competencia
- El sector agrícola en general y los sectores relacionados con el riego por aspersión en primera instancia. Ya que el control de la uniformidad y el aumento de la misma redundará no sólo directamente en la mejora de la producción sino en el ahorro del agua. Y en segunda instancia, el colectivo de las comunidades de regantes, quienes para la búsqueda de un menor consumo energético deberán disponer de información del riego por aspersión principalmente y de los requerimientos de presión para la transición al riego de baja presión.
- Finalmente, el sector público debe velar por los objetivos de racionalización de los recursos que le compete. El agua es uno de ellos y la eficiencia de uso debe de ser un objetivo prioritario. Por otro lado, la energía no lo es, pero si el medioambiente y por tanto, un ahorro de energía no renovable debe de ser también un objetivo prioritario.

Conjuntamente a estos posibles actores directamente beneficiados, será de gran importancia ampliar los datos de nuevos materiales en el *Big Data* generado. Además, el uso de metodologías específicas de interpolación de datos como la propuesto por Han et al., 1994, será una línea futura para conseguir un sistema experto que sirva para asesorar en todos los niveles, tanto para nivel de usuario como para nuevas líneas de investigación.

6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G. 1987. Dept. Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State Univ., Logan, UT, 84322 - 4105.
- Ascough, G.A., Kiker. 2002. The effect of irrigation uniformity on irrigation water requirements. *Water SA* 28(2), 235-242.
- Bralts, V.F., Pandey, S.R. Miller, A. 1994. Energy saving and irrigation performance of a modified center pivot irrigation systems. *App Eng Agric* 10(1): 27–36.
- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E. 1997. Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *J Irrig Drain Eng* 123(6): 423-442.
- Butter, A. 1990. Scheduling coefficient as a function of sprinkler spacing. *American Society of Agricultural Engineers* 90-2613 6 pp.
- Campbell Scientific (1995): CR1000 Measurement and Control Module. Instruction manual. Campbell Scientific. Inc. Leicester. UK.
- Carrion P., Tarjuelo J.M., Montero J. 2001. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: I. Description of model. *Irrig Sci* 20: 73-84.
- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by Sprinkling. Bulletin 670. Agricultural Experiment Station. University of California, Berkeley, October.
- Clemmens, A. J., Dedrick, A. R. 1994. Irrigation Techniques and Evaluations. *Management of Water Use in Agriculture* pp 64-103
- Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía (CAP). 2001. Mejora del Uso y Gestión del Agua de Riego. CD- Rom.
- Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía (CAP). 2008. Inventario y caracterización de los regadíos de Andalucía. CD- Rom.
- Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía (CAP). 2011. Agenda del Regadío Andaluz. Horizonte 2015.
- Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Faci, J.M., Martínez-Cob, A. 2003. Wind Effects on Solid-Set Sprinkler Irrigation Depth and Yield of Maize (*Zea mays*). *Irrigation Science* 22(2): 67–77
- Faria, L. C., Prado, G., Colombo, A., Oliveira, H. F., Beskow, S. 2013. Simulação da distribuição de água em diferentes condições de vento e espaçamentos entre aspersores. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(9): 918-925. <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000900002>
- Fischer, G.E. Wallender, W.W. 1986. Influence of collectors on measuring sprinkler water distribution. ASAE Paper No. 86-2105. St. Joseph, MI: ASAE.

- Fukui Y., K. Nakanishi, S. Okamura. 1980. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrigation Science* 2(1): 23-32.
- Han, S. Evans, R. G., Kroeger, M. W. 1994. Sprinkler Distribution Patterns in Windy Conditions. *Transactions of the ASAE* 37(5): 1481-1489. (doi: 10.13031/2013.28231)
- Hart, W.E. y W.N. Reynolds. 1965. Analitical design of sprinkle systems. *Trans. ASAE.* 8(1): 83-89
- Hermsmeier, L.F. 1972. Sprinkler water distribution testing under a desert environment. *Transactions of the ASAE* 15(3): 436-439.
- Hinnell, A.C., Lazarovitch, N., Furman, A., Poulton, M., Warrick, A.W., 2010. Neuro-Drip: estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using neural networks. *Irrig Sci* 28 (6): 535-544.
- Hodges, K. J. Evans, R. G. James, L. G. Kroeger, M. W., Ley, T. W. 1990: Automated facility for sprinkler performance testing. *Applied Engineering in Agriculture* 6(4): 437-440.
- ISO 7749-1:1986, Equipos de riego-Aspersores rotativos-Parte 1: Diseño y exigencias de funcionamiento.
- ISO 7749-2:1990, Equipo de riego - Aspersores Rotativos - Parte 2: Uniformidad de distribución y métodos de prueba.
- ISO Standard 15886-3, 2012. Agricultural Irrigation Equipment. Sprinklers. Part 3. Characterization of distribution and test methods. Geneva, Switzerland.
- Jiusheng Li, 1998. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. *Agricultural Water Management* 38(2): 135–146.
- Keller, J, Bliesner, RD. 1990. Sprinkle and Trickle Irrigation. AVI Book. Van Nostrand Reinhold. New York. USA.
- Lazarovitch N, Poulton M, Furman A, Warrick AW, 2009. Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. *J Eng Math* 64: 207-218.
- Li, Y., Yan, H., Xu, C., Xiao, J., Li, W., 2013. Simulation of sprinkler water distribution with droplet dynamics and evaporation. *Trans. CSAM* 44, 127–132.
- Mantovani, E.C. Villalobos, F.J. Orgaz, F., Fereres, E. 1995. Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agricultural Water Management* 27 (3): 243-257.
- Merriam, J., Burt, C., Clemmens, A., Solomon, K., Howell, T., Strelkoff, T. 1999. Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 125(2): 97-99.
- Merriam, J.L., Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. UTAH State University. Logan. Utah. USA

- Merriam, J.L., Shearer M.N., Burt C.M. 1980. Evaluating irrigation systems and practices. In: Design and Operation of Farm Irrigation Systems (ed. M.E. Jensen) ASAE monograph no. 721-760.
- Molle B, Le Gat Y, 2000. Model of water application under pivot sprinkler: II. Calibration and results. *J Irrig Drain Eng* 126(6): 348-354.
- Montero, J., 1999. Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS). Tesis doctoral, Universidad de Castilla-la Mancha, Albacete, España.
- Montero J, Tarjuelo JM, Carrion P, 2001. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: II. Calibration and validation of the model. *Irrig Sci* 20: 85-98.
- Nin, R. A., Montero Martínez, J. Tarjuelo Martín-Benito, J. M.. 2008. Caracterización de la distribución del agua en riego por aspersión estacionario. XXVI Congreso Nacional de Riegos, Huesca 133-134.
- Playan, E., Zapata, N., Faci, J.M., Tolosa, D., Lacueva, J.L., Pelegrin, J., Salvador, R., Sanchez, I., Lafita, A., 2006. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management* 8(4): 89-100.
- Richards, P.J., Weatherhead, E.K., 1993. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. *J Agric Eng Res* 54(4): 281-291.
- Rojo, J.M. 2007. Regresión lineal múltiple. Laboratorio de Estadística. Instituto de Economía y Geografía. Consejo Superior de Investigaciones científicas. Madrid
- Salvatierra, B. 2010. Uniformidad de riego de las instalaciones de riego por aspersión, *Boletín trimestral de Información al Regante*. N° 14. Enero, marzo, pp 7-8.
- Salvatierra, B. 2012. Evaluaciones Y Manejo De Las Instalaciones De Riego Por Aspersión En La Remolacha Azucarera En Andalucía. *Revista AIMCRA* 111, pp 3-9.
- Salvatierra, B. 2014. Banco automático de ensayo de aspersores con viento. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid.
- Salvatierra, B. Andrades, J.A, Gómez, E. Viqueira, S. 2015a. Resultados de ensayos del banco automático de aspersores. XXXIII Congreso Nacional de Riegos. Valencia.
- Salvatierra, B. Andrades, J.A. 2015b. Mejoras en el riego por aspersión. *Revista AIMCRA*, 122: 18-22.
- Salvatierra, B.; Morillo-Velarde, R.; Pérez Urrestarazu, L.; Andrades, J.A.; Bermejo, J.L. 2016. Ahorro energético en riego por aspersión. Pruebas de nuevos aspersores en banco automático con viento. XXXIV Congreso Nacional de Riegos, Sevilla.
- Sánchez, I. Faci, J. M. Zapata, N. 2011a. The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers. *Agricultural Water Management*; 2011. 102: 1, 13-24.

- Sánchez, I., Zapata, N. Faci, J.M., Martínez-Cob ,A. 2011b. The spatial variability of the wind in a sprinkler irrigated district: Implications for irrigation management. *Biosystems engineering* 109: 65 -76.
- Sayyadi, H., Sadraddini, A. A., Farsadi Zadeh D., Montero, J. 2012. Artificial neural networks for simulating wind effects on sprinkler distribution patterns. *Span J Agric Res* 10(4), 1143-1154.
- Seginer, I. Nir, D, Bernuth, R. 1991. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering* 117(2): 285–306.
- Seginer, I.; Kantz, D.; Nir, D.; von Bernuth, R.D. 1992. Indoor measurement of single radius sprinkler patterns. *Transactions of the ASAE*. 35(2): 523-533.
- Sheikhesmaeili , O. Montero, J., Laserna, S. 2016. Analysis of water application with semi-portable big size sprinkler irrigation systems in semi-arid areas. *Agricultural Water Management*: 163: 275–284.
- Sistema de Asistencia al Regante (SAR). 2014a. Evaluaciones de Riego por Aspersión. Procedimiento y Formulario. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), Portal Web Servifapa.
- Sistema de Asistencia al Regante (SAR). 2014b. Programa de Cálculo para Evaluaciones de Riego por Aspersión. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), Portal Web Servifapa.
- Stambouli, T., Zapata, N., Faci, J. M. 2014. Performance of new agricultural impact sprinkler fitted with plastic nozzles. *Biosystems engineering* 118: 39-51.
- Tarjuelo, JM, Montero, J, Valiente, M, Honrubia, FT, Ortiz, J. 1999a. Irrigation uniformity with medium size sprinklers Part I: characterisation of water distribution in no-wind conditions. *T ASAE* 42(3): 665–675.
- Tarjuelo, JM, Montero, J, Carrión, PA, Honrubia, FT, Calvo, MA. 1999b. Irrigation uniformity with medium size sprinklers Part II: influence of wind and other factors on water distribution. *T ASAE* 42(3): 677–689.
- Tarjuelo, JM, Ortega, JF, Montero, J, de Juan, JA. 2000. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management* 43: 263–284.
- Tarjuelo Martín Benito, J. M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi Prensa. 581 pp. Madrid, España
- Valiente, M. 1995. Metodología para la evaluación y mejora del reparto de agua con aspersores de tamaño medio en la zona de Albacete. Tesis Doctoral. ETSIA-UPM. Madrid.
- Vories, E. y Von Bernuth, R. 1986. Single nozzle sprinkler performance in wind. *Transactions of the ASAE* 29 (5): 1325-1330.

- Vories, E.; Von Bernuth, R. y Mickelson, R. 1987. Simulating sprinkler performance in wind. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 113(1): 119, 130.
- Yongchong, L., Geng, B., Haijun, Y. 2015. Development and validation of a modified model to simulate the sprinkler water distribution. *Computers and Electronics in Agriculture* 111: 38–47
- Zanon, E.R.; Testezlaf, R.; Matsura, E.J. 2000. A data acquisition system for sprinkler uniformity testing. *Applied Engineering in Agriculture* 16(2): 123-127.
- Zapata, N. Playan, E. Martinez-Cob, A. Sanchez, I. Faci, J. M., Lecina, S. 2007. From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas. *Agricultural Water Management* 87(2): 187-199.
- Zoldoske, D.F., Solomon, K.H., Norum , E.M. 1994. Uniformity Measurements for Turfgrass: What's Best? *Irrigation Notes*: Center for Irrigation Technology, Fresno, CA.

ANEXOS

ANEXO I

PROGRAMA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

ANEXO I: PROGRAMA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

A continuación se indica el software utilizado para la programación del Data Logger con el editor de "Short Cut 3.2.2" de Campbell Scientific.

```
' PROGRAMA CREADO POR CAMPBELL SCIENTIFIC SPAIN
' Datalogger: CR1000 (Direccion PakBus 1)
' Programa: Prog1.CR1
' Referencia 1 Estacion ref. 176 pluviometros 0.144358 mm control aspersores.
'
' COMPOSICION DE LA ESTACION
*****
' CR1000 Datalogger CR1000 s/n E7314-2269
' SDM-IO16 11 x SDM-IO16 Modulos de expansion 16 I/O
' Pluvio 176 x Pluviometros 0.144358 mm vuelco cazoleta s/n
' 05106-L Anemoveleta marina RMYoung
'
' CONEXIONES CANALES DATALOGGER CR1000
*****
' DIFF 1H Senal veleta potenciometrica (Verde)
' DIFF 1L
' DIFF 2H
' DIFF 2L
' DIFF 3H
' DIFF 3L
' DIFF 4H
' DIFF 4L
' DIFF 5H
' DIFF 5L
' DIFF 6H
' DIFF 6L
' DIFF 7H
' DIFF 7L
' DIFF 8H
' DIFF 8L
'
' P1 Pulsos senal anemometro 05106-L (Hilo rojo)
' P2
'
' VX1 Excitacion veleta 05106-L (Hilo azul)
' VX2
' VX3
'
' C1 SDM-C1
' C2 SDM-C2
' C3 SDM-C3
' C4
' C5
' C6
```

```

' C7
' C8
' G Conexion pluviometros
,
' 5V
' 12V +12v SDM-IO16
' SW12
,
' POWER IN 12V Positivo alimentacion Datalogger
' POWER IN G Negativo alimentacion Datalogger
,
'Declaracion de variables publicas

Public Dir_viento, Vel_viento
Public Lluvia(176)
Public Bateria, T_datalogger

Dim ComsStat(11,3)
Dim Setup(11)

Dim disparo As Boolean

Dim Counts_1(16)
Dim Counts_2(16)
Dim Counts_3(16)
Dim Counts_4(16)
Dim Counts_5(16)
Dim Counts_6(16)
Dim Counts_7(16)
Dim Counts_8(16)
Dim Counts_9(16)
Dim Counts_10(16)
Dim Counts_11(16)

Dim i, n

'Declaracion de unidades

Units Dir_viento=Grados
Units Vel_viento=m/s
Units Lluvia()=mm
Units T_datalogger=Grados C
Units Bateria=Voltios

'Definicion de la Tabla1
DataTable(Tabla1,disparo,-1)
DataInterval(0,1,Sec,10)

Totalize(176,Lluvia(),FP2,False)

```

EndTable

'Definicion de la Tabla2 (10s)

DataTable(Tabla2,True,-1)

DataInterval(0,10,Sec,10)

WindVector (1, Vel_viento, Dir_viento, FP2, False, 0, 0, 0)

FieldNames("VV_media, DV_media, Desv_St_DV")

'Maximum (1, Vel_viento, FP2, False, True) 'Maxima racha

'SampleMaxMin (1, Dir_viento, FP2, False) 'Direccion de la racha maxima del viento

EndTable

'Definicion de la Tabla2 (10s)

DataTable(Tabla3,True,-1)

DataInterval(0,10,Min,10)

Minimum (1, Bateria, FP2, False, True)

Maximum (1, T_datalogger, FP2, False, True)

EndTable

'Programa Principal

BeginProg

'Set up 11 x SDM-IO16

Scan(1,Sec,0,13)

*'Selecciona para los 11 x SDM-IO16 1-16 entradas deteccion por cierre de contacto
0-5 Volts + antirebote contacto 3.17 msec*

*SDMIO16 (Setup(1), ComsStat(1), 1, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0) 'Direccion SDM
1*

SDMIO16 (Setup(2), ComsStat(2), 2, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(3), ComsStat(3), 3, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(4), ComsStat(4), 4, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(5), ComsStat(5), 5, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(6), ComsStat(6), 6, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(7), ComsStat(7), 7, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(8), ComsStat(8), 8, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(9), ComsStat(9), 9, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

SDMIO16 (Setup(10), ComsStat(10), 10, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0)

*SDMIO16 (Setup(11), ComsStat(11), 11, 90, 3333, 3333, 3333, 3333, 1.0, 0) 'Direccion
SDM 11*

NextScan

'Toma de medidas con muestreo a 100 ms

Scan(100,mSec,200,0)

'Direccion del viento anemoveleta RMYoung 05106-L

BrHalf(Dir_viento,1,mV2500,1,Vx1,1,2500,False,0,_50Hz,355,0)

'Velocidad del viento anemoveleta RMYoung 05106-L

PulseCount(Vel_viento,1,1,1,1,0.098,0)

If Vel_viento<0.10 Then Vel_viento=0 'No tomar medidas validas por debajo del umbral de arranque

CallTable(Tabla2) 'Anemometro

NextScan

SlowSequence

Scan (1,Sec,0,0)

'Lectura pulsos acumulados en las 16 entradas deteccion por cierre de contacto 0-5 Volts + envio de senyal de interrupcion + antirebote contacto 3.17 msec

SDMIO16 (Counts_1(),ComsStat(1),1,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

'Direccion SDM 1

For n=1 To 16

Lluvia(n)=Counts_1(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_2(),ComsStat(2),2,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+16)=Counts_2(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_3(),ComsStat(3),3,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+32)=Counts_3(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_4(),ComsStat(4),4,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+48)=Counts_4(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_5(),ComsStat(5),5,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+64)=Counts_5(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_6(),ComsStat(6),6,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+80)=Counts_6(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_7(),ComsStat(7),7,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+96)=Counts_7(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_8(),ComsStat(8),8,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+112)=Counts_8(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_9(),ComsStat(9),9,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+128)=Counts_9(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_10(),ComsStat(10),10,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

For n=1 To 16

Lluvia(n+144)=Counts_10(n)

Next n

SDMIO16 (Counts_11(),ComsStat(11),11,23,3333,3333,3333,3333,0.144358,0)

'Direccion SDM 11

For n=1 To 16

Lluvia(n+160)=Counts_11(n)

Next n

For i=1 To 176

If Lluvia(i)>=0.144358 Then disparo=true

Next i

'Medida de la Bateria (En terminales POWER IN del CR1000)

Battery(Bateria)

'Medida de la temperatura del Panel de conexiones

PanelTemp(T_datalogger,_50Hz)

'Llamar tablas para calculo y almacenamiento resultados

CallTable(Tabla1) 'Pluviometria

CallTable(Tabla3) 'Alimentacion logger y temperatura del panel

disparo=False

NextScan

EndProg

ANEXO II

RESULTADOS DE ENSAYOS DE ASPERSORES EN EL BANCO DE ENSAYO

ANEXO II: RESULTADOS DE ENSAYOS DE ASPERSORES

Este anexo se compone del directorio de todos los ensayos realizados para esta tesis. En él, se integra tanto los realizados en el banco automático con viento con ensayos matriciales, como ensayos realizados en un banco de ensayo radial para obtener información de determinados aspersores en condiciones sin viento y con la metodología radial.

Los datos y resultados obtenidos se ordenaron en una base de datos con la información clasificada. Los resultados de cada uniformidad de riego obtenida están catalogados con las siguientes variables:

a) Variables del ensayo:

1. Identificación del ensayo
2. Fabricante del aspersor
3. Modelo del aspersor
4. Boquilla principal
5. Boquilla secundaria
6. Diámetro de la boquilla principal (*según apartado 3.2.4.1*)
7. Accesorio de la boquilla principal
8. Presión del ensayo
9. Velocidad del viento
10. Rango de velocidad del viento
11. Caudal
12. Índice de grosor de gota (*según ecuación 3.1*)
13. Pérdidas por evaporación y arrastre (*según ecuación 3.2*)

b) Variable del registro de la simulación de solapamiento de marco:

14. Disposición del marco (rectangular o triangular)
15. Dirección del viento (perpendicular, oblicua o paralela al ramal de riego)
16. Distancia entre aspersores
17. Distancia entre ramales
18. Pluviosidad

A continuación, se muestra en la figura 60 la estructura de tablas creada en la base de datos. Una vez se introdujeron todos resultados de uniformidad de todas las simulaciones de solapamiento y direcciones de viento, se dispuso de la base para cualquier acción sobre el conjunto de los 47.142 registros de uniformidades, tanto en formato de consulta como en formato de informe. Esto permitió estudios como los mostrados a lo largo de este trabajo.

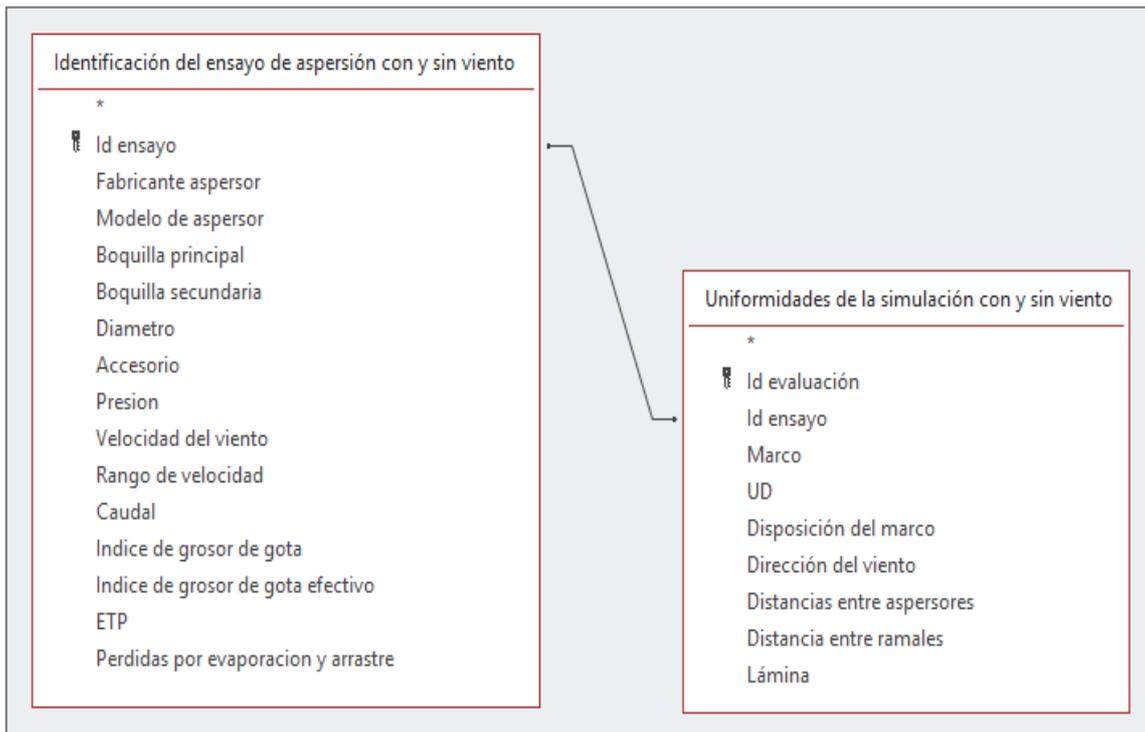


Figura 60. Estructura de tablas de la base de datos generada con los resultados de los ensayos.

AII.1 Ensayos y resultados realizados en el banco de ensayo automático con viento.

Los 29.160 resultados de uniformidad de riego de los ensayos de aspersores ensayados con la metodología matricial y con viento se refieren a los ensayos de los siguientes aspersores.

Tabla 33. Relación de aspersores ensayados en el banco automático con viento.

Marca	Modelo	Boquilla principal	Vaina prolongadora	Boquilla secundaria	Tipo de boquilla	Presión (kPa)	Viento (m/s)	
Naandanjan	5035 SD	9/64	Si		De bayoneta	350	1,71	
						250	2,25	
						200	2,71	
	6025 SD	5/32	Si			350	1,62	
						250	2,13	
						200	1,61	
						350	3,23	
						250	2,79	
						200	2,97	
Nelson	R2000-WF	9/64			Rotatoria	350	2,74	
						250	2,28	
						200	0,89	
						350	3	
						250	8,54	
	R33-LP	1/8					200	2,79
							350	2,25
							250	2,43
							200	1,75
							350	2,18
							250	2
							200	2,77
							350	1,86
							200	2,59
							Unirain	F46
250	2,73							
350	3,38							
350	1,47							
250	2,09							
200	2,42							
350	3,68							
F46-PRO	1/8	Si			350	0,8		
					250	3,41		
					200	3,31		
					350	1,39		
					350	1,97		
					250	1,01		
					350	2,11		
					250	2,82		
					350	2,03		
					250	3,13		
Senninger	3023-2	1/8	Si	3/32	De bayoneta	200	3,69	
						350	2,94	
						350	1,39	
						250	1,39	
						200	2,52	
						350	2,06	
						250	2,23	
200	0,61							
Vyrsa	Vyv 36	5/32	Si	3/32	De rosca	350	2,91	
						250	2,09	
						200	0,84	
						350	2,59	
						250	1,5	
	Vyv 37	9/64	Si	3/32	De bayoneta	200	0,87	
						350	2,73	
						250	3,23	
						200	2,97	
						350	3,37	
					250	2,35		
					200	2,42		

AII.2. Ensayos radiales sin viento.

Igualmente, los 17.982 resultados de uniformidad de riego de los ensayos de aspersores ensayados con la metodología radial y sin viento se refieren a los ensayos de los siguientes aspersores:

Tabla 34. Relación de aspersores ensayados en el banco de ensayo con metodología radial sin viento.

Marca	Modelo	Boquilla principal	Vaina prolongadora	Boquilla secundaria	Tipo de boquilla	Presión (kPa)
Unirain	F46	1/8	Si		De rosca	350
						350
		5/32	Si			250
						200
		9/64	Si			150
						350
						250
		9/64	No			200
						150
						350
	250					
	F46-PRO	3/16	Si			200
						150
		3/16	Si	3/32		250
						200
		5/32	Si	3/32		250
						200
		11/64	Si			350
						250
						200
150						
11/64	Si	3/32	350			
			250			
			200			