



e s c u e l a
p o l i t é c n i c a
s u p e r i o r
d e h u e s c a



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL

Efecto de la presión sobre la uniformidad de un
riego por aspersión fija en Sangarrén (Huesca).

Effect of pressure on the uniformity of fixed
sprinkler irrigation in Sangarrén (Huesca).

Autor

Antonio Gayán Benedet

Director

César González Cebollada

Escuela Politécnica Superior de Huesca

2023

Índice general

Índice de tablas	4
1. Resumen	6
2. Abstract.....	7
3. Objetivos y presentación	8
3.1 Justificación.....	8
3.2 Metodología	8
4. Introducción.....	10
4.1 Conceptos básicos:.....	10
4.2 Impacto de la uniformidad en los cultivos:.....	10
4.3 Estudio de la distribución del agua en el suelo:	11
4.4 Medida de distribución del agua de los aspersores:	11
4.5 Estudio de la uniformidad del riego en el cultivo de invierno como el trigo	12
4.6 Estudio de la uniformidad del riego en un cultivo de verano como el maíz:.....	12
4.7 Determinación del caudal ensayo maíz:.....	12
4.8 Estudio de los rendimientos del maíz con tres tratamientos de riego:	12
4.9 Otras técnicas utilizadas para ensayos de maíz:	15
4.10 Caracterización de la técnica de distribución radial de agua:.....	19
4.11 Efecto de la elevación de la lata de captura en el rendimiento del riego	20
4.12 Un dosel de maíz desarrollado modifica el rendimiento del riego	20
5. Fundamentos teóricos	24
5.1 Definición de la terminología a utilizar	24
5.2 Eficiencia de riego	25
5.3 Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión	26
5.4 Eficiencia de la distribución (EDa).....	26
5.5 Pérdidas por evaporación y arrastre por el viento:.....	27
5.6 Pérdidas por fugas en conducciones:	27
5.7 Terminología en la aplicación del agua	27
5.8 Evaluación de sistemas de aspersión estacionarios	28
5.8.1 Datos recogidos en la evaluación.....	28
5.8.2 Equipo necesario	29
5.8.3 Procedimiento de campo	29
5.8.4 Obtención de los parámetros de evaluación	30
5.9 Evaluación de equipos pivote.....	30
5.9.1 Datos recogidos durante la evaluación	30
5.9.2 Equipo necesario	30
5.9.3 Forma de proceder en el campo	31
5.9.4 Obtención de los parámetros de evaluación	32
5.10 Uniformidad circular	32
6. Metodología.....	33
6.1 Presentación:	33
6.2 Características técnicas de los aspersores.	37
6.3 Procedimientos:	38
7. Resultados:	45
7.1 Primer ensayo: Pluviometría	45
7.2 Segundo ensayo: Pluviometría	48
7.3 Tercer ensayo: Pluviometría	51
7.4 Primer ensayo (P=3,9 bar)	53
7.4.1 Tabla de mm de campo:.....	53
7.4.2 Tabla de desviaciones:	54
7.5 Segundo ensayo (P=3,5 bar)	55
7.5.1 Tabla de mm de campo:.....	55
7.5.2 Tabla de desviaciones.....	56

7.6 Tercer ensayo (P=3 bar)	57
7.6.1 Tabla de mm de campo:	57
7.6.2 Tabla de desviaciones.....	58
7.7 Primer ensayo: Gráficos de desviaciones	58
7.8 Segundo ensayo: Gráficos de desviaciones	60
7.9 Tercer ensayo: Gráficos de desviaciones	62
7.10 Parámetro de la presión:	64
7.11 Uniformidad de distribución:.....	65
7.12 Eficiencia potencial de riego:.....	66
7.13 Coeficiente de uniformidad:.....	67
7.14 Valor medio recogido:	68
7.15 Valor medio aplicado:.....	69
7.16 Todos los parámetros:.....	70
8.Discusión y conclusiones.....	71
9.Bibliografía.....	72

Índice de tablas

Tabla 1. Datos de la instalación de riego por aspersión en la parcela que se trabaja. Fuente: Hyrasa Hidráulica y Riego por Aspersión.	36
Tabla 2. Los datos de mm de campo que han caído sobre los vasos en el ensayo numero 1. Fuente: Elaboración propia a partir de los Excel calculados.	53
Tabla 3. Los valores de las desviaciones que se producen en el ensayo 1. Fuente: Elaboración propia a partir de los Excel calculados.	54
Tabla 4. En el ensayo número 2, se han registrado los valores de milímetros de campo que han caído sobre los vasos. Fuente: Elaboración propia en base a Excel calculadas.	55
Tabla 5. En el ensayo número 1, se han registrado los valores de las desviaciones que se han producido. Fuente: Elaboración propia a partir de los Excel calculados	56
Tabla 6. En el ensayo número 3, se han registrado los valores de milímetros de campo que han caído sobre los vasos. Fuente: Elaboración propia en base a los Excel calculados.	56
Tabla 7. Los valores de las desviaciones que se producen en el ensayo 3. Fuente: Elaboración propia	57

El Trabajo de Fin de Grado que presento para su exposición y defensa es original y todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.



Fdo: Antonio Gayán Benedet.

1. Resumen

El objetivo general de este trabajo consiste en estudiar la influencia que ejerce la presión del agua sobre los parámetros de uniformidad en el riego por aspersión en cobertura fija.

Con el fin de lograr este objetivo general, se llevará a cabo una evaluación del sistema de riego para diferentes valores de presión del agua. En la primera evaluación la presión será de 3,9 bar, en la segunda de 3,5 bar y en la tercera de 3 bar. La finca objeto de estudio se sitúa en la provincia de Huesca, en el municipio de Sangarrén, y cuenta con un grupo motobomba propio, lo que permite ajustar fácilmente la presión de riego mediante la válvula de regulación del bombeo.

Las evaluaciones se llevarán a cabo siguiendo los procedimientos establecidos en la literatura de referencia, especialmente en el trabajo de Tarjuelo (1995), el cual se basa en el análisis de la variabilidad espacial de la pluviometría mediante la instalación de un conjunto de vasos en una disposición de cuadrícula en el campo.

A partir de los registros pluviométricos obtenidos, se generarán gráficos tridimensionales que permitirán visualizar el grado de uniformidad de los riegos aplicados.

Para cada evaluación, se calcularán los siguientes parámetros: uniformidad de distribución (UD), coeficiente de uniformidad (CU), eficiencia potencial de riego (EPR), valor medio recogido (VMR) y valor medio aplicado (VMA). Se analizará la influencia de la presión del agua de riego en cada uno de estos parámetros.

Se representará gráficamente la influencia de la presión sobre cada uno de los parámetros calculados, con el propósito de determinar la presión mínima de trabajo más adecuada para el riego.

Se concluye que en la finca estudiada no es aconsejable reducir la presión de alimentación, por su posible efecto en la producción. En fincas con un sistema de riego similar, si la presión es muy elevada se recomienda valorar una reducción a 3.9 bar si se desea ahorrar energía, ya que la uniformidad resulta adecuada.

Palabras clave: presión, uniformidad, coeficiente de uniformidad, eficiencia potencial de aplicación, pérdidas de agua.

2. Abstract

The general objective of this work is to study the influence of water pressure on the uniformity parameters in fixed-cover sprinkler irrigation.

In order to achieve this general objective, an evaluation of the irrigation system will be carried out at different levels of water pressure. In the first evaluation the pressure will be 3.9 bar, in the second 3.5 bar and in the third 3 bar. The farm under study is located in the province of Huesca, in the municipality of Sangarrén, and it has its own motorized pump group, which allows the irrigation pressure to be easily adjusted using the pump regulation valve.

The evaluations will be carried out following the procedures established in the reference literature, especially in the work of Tarjuelo (1995), which is based on the analysis of the spatial variability of rainfall by installing a set of plastic cups in a grid layout in the field.

From the pluviometric records obtained, three-dimensional graphics will be generated that will allow visualizing the degree of uniformity of the applied irrigations.

During each evaluation, the following parameters will be calculated: distribution uniformity (UD), coefficient of uniformity (CU), potential irrigation efficiency (EPR), mean value collected (VMR), mean value applied (VMA). The influence of irrigation water pressure on each of these parameters will be analyzed.

The influence of pressure on each of the calculated parameters will be graphically represented, with the purpose of determining the most appropriate minimum working pressure for irrigation.

It is concluded that in the studied farm it is not advisable to reduce the feeding pressure, due to its possible effect on production. On farms with a similar irrigation system, if the pressure is very high, it is recommended to consider a reduction to 3.9 bar in order to save energy, since the uniformity is adequate.

Keywords: pressure, uniformity, uniformity coefficient, potential application efficiency, water losses.

3. Objetivos y presentación

3.1 Justificación

El objetivo general de este trabajo consiste en estudiar la influencia que ejerce la presión del agua sobre los parámetros de uniformidad en el riego por aspersión en cobertura fija.

Para ello, se realizarán al menos tres evaluaciones del riego bajo diferentes presiones de trabajo, determinando en cada una de ellas parámetros de uniformidad y eficiencia del riego.

El trabajo de campo se realizará en una finca de regadío dotada de un sistema de aspersión fija y localizada en el término municipal de Sangarrén (Huesca).

El interés de un trabajo de este tipo radica en la conveniencia de tratar de ahorrar energía en los sistemas de riego, tanto por razones económicas como ambientales. Así, puede resultar interesante conocer cuál es la mínima presión que ofrece parámetros de uniformidad aceptables para tratar de aplicar los riegos con una presión que no resulte innecesariamente elevada.

El trabajo se alinea específicamente con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

ODS 6.4 “De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua”. Justificación: se considera que un estudio sobre la uniformidad del riego contribuye al uso eficiente de los recursos hídricos.

ODS 7.3 “De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética”. Justificación: se considera que la reducción de la presión del agua de riego contribuye a la mejora de la eficiencia energética, al evitarse gastos innecesarios de energía.

3.2 Metodología

Para alcanzar el objetivo general, se procederá a evaluar el sistema de riego bajo diferentes presiones del agua. La finca de estudio posee un grupo motobomba propio, de manera que la presión de riego puede ser fácilmente modificada gracias a la válvula de regulación del bombeo.

Las evaluaciones se realizarán siguiendo los procedimientos establecidos en la bibliografía de referencia, principalmente Tarjuelo (1995), basada en el estudio de la variación espacial de la pluviometría, mediante la instalación en campo de un conjunto de pluviómetros dispuestos en cuadrícula.

Con las pluviometrías obtenidas, se realizarán gráficos tridimensionales que permitan visualizar el grado de homogeneidad de los riegos aplicados.

Los parámetros a calcular en cada evaluación serán: uniformidad de distribución (UD), coeficiente de uniformidad (CU), eficiencia potencial de

aplicación (EPA) y las pérdidas. Se estudiará la influencia de la presión del agua de riego en cada parámetro.

Se representará gráficamente la influencia de la presión sobre cada parámetro calculado, para tratar de determinar qué presión de trabajo mínima debería utilizarse para el riego.

4.Introducción

4.1 Conceptos básicos:

La disminución de la demanda energética en los sistemas de riego presurizados es uno de los principales objetivos de los agricultores y las Asociaciones de Usuarios de Agua (AUA). La optimización de las instalaciones de riego, como las estaciones de bombeo y las redes colectivas presurizadas, ha demostrado ser una estrategia valiosa y rentable (Rodríguez Díaz *et al.*, 2009; Moreno *et al.*, 2010; Fernández García *et al.*, 2013).

Actualmente, se están explorando soluciones adicionales en las AUA, entre las cuales se destaca la reducción de los requisitos energéticos a nivel de finca mediante la disminución de la presión de trabajo en las boquillas de los aspersores (Robles *et al.*, 2017). Al reducir la presión en las boquillas, se logra una disminución en los requerimientos de bombeo y, por ende, en los costos energéticos. Además, al considerar bajas presiones durante la fase de diseño de la red colectiva, es posible reducir el área que requiere bombeo dentro de una AUA.

El Coeficiente de Uniformidad (CU) (Christiansen, 1942) es una medida utilizada para evaluar la uniformidad del riego por aspersión sobre el dosel de un cultivo. Esta medida es fundamental para el diseño y la gestión del riego, ya que busca caracterizar la variabilidad en el plano horizontal donde el agua de riego es interceptada por las plantas.

Para sistemas de aspersión fijos, Keller y Bliesner (1990) han clasificado la uniformidad del riego como "baja" cuando el CU es inferior al 84%. El diseño de los sistemas de riego implica un equilibrio entre el costo de inversión, el rendimiento del sistema y los ingresos netos. En el caso de cultivos de alto valor económico, existen mayores posibilidades de invertir en sistemas de riego de alta uniformidad en comparación con cultivos de menor valor (Seginer, 1978).

4.2 Impacto de la uniformidad en los cultivos:

En cuanto a la uniformidad del riego, se ha observado que no siempre tiene un efecto significativo en el rendimiento del trigo. Es importante tener en cuenta que solo la mitad de las necesidades hídricas del trigo se cumplen mediante riego, mientras que el resto proviene de las precipitaciones y la humedad del suelo. Mateo *et al.* (1997) encontraron que en cultivos con una respuesta de producción curvilínea, como el algodón, una baja uniformidad de riego no afecta el rendimiento. Sin embargo, puede provocar variaciones en el crecimiento vegetativo y el momento de apertura de los capullos, lo que dificulta la cosecha mecánica. Montazar y Sadeghi (2008) informaron que la uniformidad de los aspersores tiene un impacto directo en el crecimiento de la alfalfa y el rendimiento del heno.

Brenan (2008) descubrió que hay incentivos económicos significativos para adoptar sistemas de riego por aspersión más uniformes en la producción de lechuga. Jiménez *et al.* (2010) reportaron un fuerte efecto del Coeficiente de

Uniformidad de los aspersores en el rendimiento de la cebolla. Varios estudios experimentales sobre riego por aspersión en maíz de riego (Stern y Bersler, 1983; Dechmi *et al.*, 2003; Sánchez *et al.*, 2010; Caveró *et al.*, 2008; Urrego-Pereira *et al.*, 2013) coinciden en que cuando se aplica riego de acuerdo con las necesidades hídricas del cultivo, el rendimiento y su variabilidad se ven afectados por la uniformidad del riego.

4.3 Estudio de la distribución del agua en el suelo:

Diversas investigaciones se han enfocado en el estudio de la redistribución del agua en el suelo en sistemas de riego por aspersión. Estudios como los de van Wesenbeeck y Kachanoski (1988), van Wesenbeeck *et al.* (1988), Li y Kawano (1996), Paltineanu y Starr (2000), Sánchez *et al.* (2010) y Martello *et al.* (2015) han abordado este tema. En particular, Paltineanu y Starr (2000) y Sánchez *et al.* (2010) han medido la dinámica del agua en el suelo en diferentes posiciones, tanto dentro como entre las hileras de maíz, utilizando sondas de capacitancia. Estos estudios destacan la importancia de la redistribución del agua inducida por el dosel del cultivo, la cual afecta la variabilidad espacial del agua en el suelo.

Es importante tener en cuenta que la precipitación que llega al suelo después de pasar a través del dosel del cultivo puede tener una distribución espacial distinta a la precipitación recogida por encima del dosel. De hecho, la arquitectura del dosel del cultivo distribuye la precipitación en tres procesos: flujo del tallo, caída y almacenamiento de interceptación (Bui y Box, 1992). El flujo del tallo se refiere al agua que es interceptada por las hojas y ramas y fluye a través del tallo hasta el suelo circundante. La caída se refiere al agua que cae directa o indirectamente sobre la superficie del suelo a través de las hojas. El almacenamiento de interceptación se refiere a la cantidad de agua que permanece temporalmente en la planta después del riego y se evapora directamente de las hojas y tallos. Varios estudios (van Wesenbeeck y Kachanoski, 1988; van Wesenbeeck *et al.*, 1988; Lamm y Manges, 2000; Li y Rao, 2000; Paltineanu y Starr, 2000; Canone *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2017) han informado sobre estos procesos y sus efectos en la distribución del agua en el suelo.

4.4 Medida de distribución del agua de los aspersores:

La medición de la distribución del agua de los aspersores por encima del dosel del cultivo sigue un conjunto de normas bien establecidas, como la Norma ISO 7749/1, Norma ISO 7749/2 y ASAE (1994). Sin embargo, la medición de la distribución del agua de los aspersores por debajo del dosel del cultivo no está estandarizada y sigue siendo un tema de investigación. Varios estudios han abordado la interacción entre el agua de riego o lluvia y las copas de los cultivos, como los de van Wesenbeeck y Kachanoski (1988), van Wesenbeeck *et al.* (1988), Lamm y Manges (2000), Li y Rao (2000) y Paltineanu y Starr (2000). Estos estudios han utilizado diferentes metodologías de medición, centrándose a menudo en la determinación del flujo del tallo.

Por ejemplo, van Wessenbeeck y Kachanoski (1988) y van Wessenbeeck *et al.* (1988) midieron el contenido de agua del suelo utilizando reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) en hileras y entre hileras de maíz, lo que les permitió analizar la importancia de la partición del agua inducida por el dosel del cultivo en la distribución espacial del agua en el suelo.

4.5 Estudio de la uniformidad del riego en el cultivo de invierno como el trigo

Li y Rao (2000) midieron la distribución del agua del suelo por encima y por debajo de un dosel de trigo utilizando dispositivos de recolección de agua similares. Sin embargo, en su estudio, las latas de recolección colocadas debajo del dosel de trigo no separaron el flujo del tallo y la caída. Los resultados mostraron que la uniformidad del riego de trigo fue mayor debajo del dosel que sobre el dosel.

4.6 Estudio de la uniformidad del riego en un cultivo de verano como el maíz:

Lamm y Manges (2000) midieron directamente el caudal y la precipitación en 18 plantas individuales dentro de un campo de maíz con riego de pivote central. Utilizaron un tubo de plástico con una ranura alrededor del tallo de la planta para medir el flujo del tallo. Descubrieron que el flujo del tallo disminuía linealmente con el espaciamiento de las plantas y aumentaba linealmente con la profundidad de riego, mientras que la precipitación aumentaba linealmente con el espaciamiento de las plantas y la profundidad de riego.

4.7 Determinación del caudal ensayo maíz:

Otros estudios, como el de Hupet y Vanclooster (2005), estimaron el caudal como la diferencia entre la precipitación incidente medida, la precipitación medida y la interceptación estimada de los cultivos. Estos autores informaron una variabilidad espacial muy alta en la precipitación que alcanza el suelo debajo del dosel de maíz, con coeficientes de variación que oscilan entre el 78% y el 189%.

Martello *et al.* (2015) llegaron a la conclusión de que a medida que aumentaba la precipitación, la relación entre el flujo del tallo y la caída de agua disminuía de manera logarítmica. Esto sugiere que en condiciones de estrés hídrico, el maíz puede retener efectivamente el agua de la precipitación cerca de las raíces. Por otro lado, Liu *et al.* (2015) emplearon láminas altamente absorbentes de agua alrededor de cada tallo de maíz para medir el caudal de agua. Se seleccionaron veinte plantas para medir el flujo del tallo en un área experimental total de 6 m². Estos investigadores llegaron a la conclusión de que el flujo del tallo aumentaba a medida que se incrementaba la precipitación y el índice de área foliar, pero disminuía con un aumento en la intensidad de la precipitación.

4.8 Estudio de los rendimientos del maíz con tres tratamientos de riego:

En un estudio previo, Robles *et al.* (2017) llevaron a cabo un experimento de campo durante dos años para medir las diferencias en el rendimiento del maíz y el rendimiento del riego (coeficiente de uniformidad, CU, y pérdidas por arrastre y evaporación, WDEL) resultantes de tres tratamientos de riego. Estos

tratamientos incluyeron dos presiones de boquilla (300 kPa estándar y 200 kPa de baja presión) y, en el caso de baja presión, dos modelos de aspersores (aspersor de impacto de latón convencional CIS y aspersor de impacto de plástico con placa deflectora en el brazo de accionamiento DPIS).

Los investigadores no encontraron diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento del maíz entre los tres tratamientos de riego basados en los requerimientos de agua del cultivo. Sin embargo, se observó que el CU medido por encima del dosel del maíz fue un 10% más alto para el tratamiento de presión estándar (93%) en comparación con los tratamientos de baja presión (promedio del 83%).

El objetivo de esta investigación fue analizar por qué existía una diferencia considerable (10%) y consistente (a lo largo de dos cosechas) en el CU medido por encima del dosel del maíz entre los dos tratamientos de riego a diferentes presiones (200 kPa y 300 kPa) que no tuvo un efecto en el rendimiento del maíz. Se replicó el diseño experimental informado por Robles *et al.* (2017) durante un año adicional, implementando nuevamente los tres tratamientos: CIS300, CIS200 y DPIS200. Los tratamientos tuvieron la misma tasa de aplicación y programación de riego. Con el fin de lograr este objetivo, se realizaron mediciones experimentales de las diferencias en la distribución del tamaño de las gotas, las curvas de distribución radial, la distribución del agua en el suelo y la partición del agua del dosel del maíz para los tres tratamientos de riego. Se realizó un análisis estadístico para examinar el efecto de la distribución del agua de riego (por encima y por debajo del dosel de maíz) en el rendimiento de grano para todos los tratamientos de riego.

En el experimento de campo se emplearon tres tipos de aspersores de impacto. El primer aspersor utilizado fue un aspersor estándar de impacto fabricado en latón (RC FARM 130, Riegos Costa, Lleida, España) equipado con una boquilla doble también de latón (4,4 mm y 2,4 mm). Este aspersor operó a una presión de 300 kPa y se denotó como CIS300. El segundo aspersor empleado fue un aspersor estándar de impacto fabricado en latón (RC FARM 130, Riegos Costa, Lleida, España) equipado con una boquilla doble de plástico (5,16 mm y 2,5 mm) y funcionó a una presión de 200 kPa, denominado CIS200.

Por último, se utilizó un rociador de impacto de plástico modificado con una placa deflectora en el brazo impulsor (5035, NaanDanJain, Naan, Israel), también equipado con una boquilla doble de plástico (5,16 mm y 2,5 mm), y operando a una presión de 200 kPa, conocido como DPIS200. Cabe mencionar que en todos los casos se emplearon aspersores y boquillas comerciales. El caudal promedio de los tres aspersores fue de 1.680 L/h, con diferencias en los caudales entre los tratamientos de presión inferiores al 4%.

El DPIS es un aspersor de impacto innovador que se comercializa para su uso a presiones bajas. Este diseño se basa en los desarrollos propuestos por Kincaid (1991), quien introdujo una modificación al aspersor de impacto convencional al agregar un deflector al brazo impulsor. Esta modificación

resultó en una desviación intermitente del chorro de agua que incrementa la precipitación en la región cercana al aspersor, que suele recibir menos riego en condiciones de baja presión.

Para caracterizar las distribuciones radiales de agua de los tres tipos de aspersores, se llevaron a cabo pruebas en un centro de investigación al aire libre. Cada aspersor se instaló en la parte superior de un tubo vertical a una altura de 2,30 metros sobre el nivel del suelo. La precipitación generada por cada aspersor se recolectó en cuatro latas distribuidas a diferentes distancias desde el aspersor, que variaban desde 0,50 metros hasta 16,0 metros, con una separación de 0,50 metros entre las latas. Cada radio de recolección tenía una elevación de lata distinta: 0,50 metros, 1,00 metros, 1,50 metros y 2,00 metros sobre el nivel del suelo para el primer, segundo, tercer y cuarto radio, respectivamente. Es importante destacar que todos los experimentos se llevaron a cabo en condiciones de viento bajo, con velocidades inferiores a 1,0 metros por segundo.

La distribución del diámetro de las gotas se evaluó en los tres tipos de aspersores mediante el uso de un disdrómetro óptico, un instrumento que mide de manera precisa el tamaño de las gotas. Las mediciones se llevaron a cabo en dos configuraciones:

Se midieron los diámetros de las gotas a diferentes distancias horizontales desde el aspersor, que iban desde 1,00 metro hasta 13,00 metros, con incrementos de 1,00 metro. Estas mediciones se realizaron a una altura de 1,00 metro sobre el nivel del suelo utilizando el disdrómetro.

Se realizaron mediciones adicionales de los diámetros de gota a distancias horizontales que variaban desde 3,00 metros hasta 14,00 metros, con incrementos de 1,00 metro. Estas mediciones se llevaron a cabo utilizando el disdrómetro a una altura de 2,00 metros sobre el nivel del suelo.

Para estas mediciones se utilizó un disdrómetro láser-óptico de tamaño y velocidad de partículas (PARSIVEL, OTT Messtechnik GmbH & Co. KG, Kempten, Alemania). Este instrumento utiliza un láser y puede medir de forma independiente el tamaño y la velocidad de caída de los hidrometeoros a través de un haz láser. La lámina láser tiene unas dimensiones de aproximadamente 180 mm de largo, 30 mm de ancho (5400 mm²) y 1 mm de altura. El tamaño de las gotas se estima a partir de la máxima atenuación de la señal, mientras que la duración de la presencia de las gotas dentro del haz láser proporciona la velocidad de caída (Tokay *et al.*, 2014).

En este estudio se aplicaron las adaptaciones propuestas por Paniagua (2015) para mejorar la recopilación de datos y el procesamiento de un disdrómetro en el contexto de aplicaciones de riego por aspersión. Es importante tener en cuenta que las gotas de agua de riego no caen de forma horizontal. De hecho, Paniagua (2015) informó que el ángulo de caída varía según la distancia horizontal y vertical respecto al aspersor.

Con el fin de obtener mediciones comparables utilizando el disdrómetro, es necesario que el área de la sección transversal del haz láser expuesto a la caída de las gotas sea constante. Para lograr esto, Paniagua (2015) desarrolló un soporte o pedestal para el disdrómetro, que permite inclinar el sensor láser de manera que quede perpendicular al ángulo promedio de caída. Este pedestal se utilizó en todos los experimentos realizados y reportados en este estudio.

Se utilizó el método de fotografía a baja velocidad (1/100 s) propuesto por Salvador *et al.* (2009) para determinar el ángulo de caída más común de las gotas. En cada distancia horizontal desde la posición elevada del rociador hasta el disdrómetro, se tomaron fotografías de alta calidad de las gotas. Se seleccionaron las gotas de buena calidad para medir los ángulos. En cada ubicación, se obtuvo el ángulo de caída promedio de las gotas, calculado a partir de los ángulos más frecuentes obtenidos de cada imagen.

Además, se instaló un disdrómetro en cada ubicación con un ángulo de inclinación igual al ángulo de caída de las gotas. Esto aseguró que el rayo láser y las gotas fueran perpendiculares entre sí.

Se realizaron comparaciones en diferentes distancias horizontales desde el rociador, considerando las frecuencias de diámetro de las gotas, los tipos de rociadores y las elevaciones del disdrómetro. También se compararon los volúmenes de riego estimados en cada punto de medición.

4.9 Otras técnicas utilizadas para ensayos de maíz:

Se llevó a cabo un ensayo en un campo de maíz en la parcela del Centro de Investigación Agraria Aula en Montañana (Zaragoza) durante la temporada agrícola de 2017. Se sembró maíz de la variedad Pioneer P1758 el 4 de abril, con una separación de 0,75 metros entre las hileras y una densidad de siembra de 89.500 semillas por hectárea. Para la fertilización, se aplicaron 64 kilogramos por hectárea de nitrógeno (N), 120 kilogramos por hectárea de pentóxido de fósforo (P₂O₅) y 120 kilogramos por hectárea de óxido de potasio (K₂O) antes de la fecha de siembra.

Además, se realizaron dos aplicaciones de 100 kilogramos por hectárea de nitrógeno en forma de una solución de nitrato de amonio-urea (con un contenido del 32% de nitrógeno) en las etapas de crecimiento V6 y V12. Las malas hierbas y las plagas fueron controladas siguiendo las mejores prácticas de manejo en la zona.

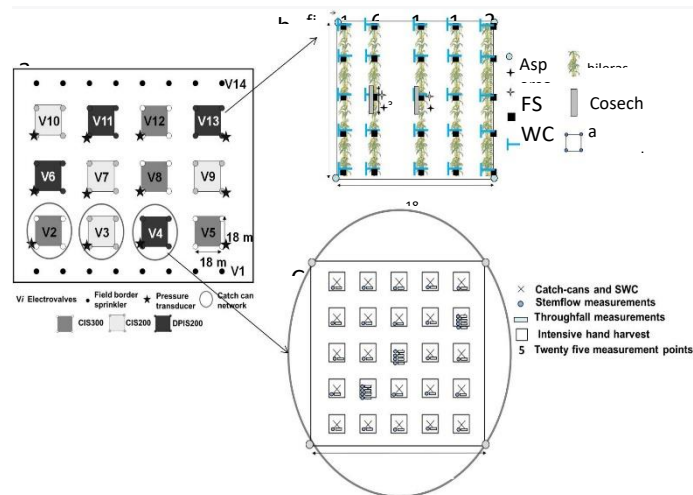


Figura 1. b) Puntos de medición de las variables monitoreadas en todas las parcelas experimentales: altura de planta, radiación fotosintéticamente activa (PAR) y cosecha manual para biomasa, contenido de agua del suelo inicial y final (ISWC y FSWC). Fuente. Zapata et al. (2018) c) Puntos de medición para las variables monitoreadas en una réplica de cada tratamiento: red de captura, red de flujo de tallo y caída, contenido de agua del suelo

Se determinó el contenido de agua en el suelo antes y después de la siembra y la cosecha, utilizando un método de medición gravimétrico. Se seleccionaron dos puntos de medición en cada parcela para tomar muestras de agua del suelo (Figura 1b). Se evaluó la variabilidad gravimétrica del contenido de agua en el suelo antes y después de dos eventos de riego. Para obtener las muestras de suelo, se utilizó una barrena manual de 0,05 metros de diámetro (fabricada por Eijkelkamp Agriresearch Equipment BV, Países Bajos) cada 0,30 metros de profundidad, hasta alcanzar una profundidad de 0,90 metros. Se muestrearon un total de veinticinco puntos de medición (Figura 1c) en una parcela replicada para cada tratamiento de riego.

Se evaluó la forma en que se distribuye el agua de riego por encima del cultivo de maíz utilizando una configuración de doble red de 25 recipientes de captura al comienzo de la temporada de cultivo. Estos recipientes de captura se colocaron a elevaciones de 1,00 y 2,00 metros sobre el nivel del suelo (Figura 1c).

Las redes de recipientes de captura se instalaron en cada réplica de los diferentes tratamientos de riego (Figura 1a), donde también se monitoreó el contenido de agua en el suelo. Cada recipiente tenía forma cónica, con una altura de 0,40 metros y una boca circular con un diámetro de 0,16 metros (lo que representa un área de captación de 0,020 metros cuadrados). Los recipientes de captura fueron marcados en intervalos de 1 milímetro de precipitación para su medición precisa.

Cuando el cultivo de maíz alcanzó una altura de un metro, se retiró la primera red de recipientes de captura ubicada a un metro sobre el nivel del suelo. La segunda red se mantuvo en su lugar hasta que el dosel del maíz alcanzó una altura de 2,00 metros. Luego, se elevó la red para asegurarse de que siempre

estuviera por encima del dosel del cultivo. Al final de la temporada de crecimiento, la boca del recipiente de captura se fijó a una altura de 2,65 metros sobre el nivel del suelo.

Se determinó la uniformidad del riego para cada evento realizado por encima del dosel del cultivo (CUAc, %). La uniformidad estacional del riego (CUAc_seasonal) se calculó utilizando la ecuación de uniformidad aplicada a la cantidad total de riego acumulado por encima del dosel del cultivo, que se recolectó en cada conjunto de recipientes de captura.

La deriva del viento y las pérdidas por evaporación sobre el dosel del cultivo (WDELac) se estimaron como la diferencia entre la cantidad de riego aplicada y la cantidad recolectada en los recipientes de captura, expresada como un porcentaje de la cantidad de riego aplicada. Se determinaron las pérdidas por deriva del viento y evaporación tanto para cada evento de riego evaluado como para el total de la temporada (WDELac_seasonal).

Para evaluar la distribución del agua de riego a través del dosel del maíz, se midieron el flujo del tallo y la caída del agua desde el 18 hasta el 28 de julio. Estas mediciones se realizaron en 25 plantas seleccionadas de cada tratamiento de riego (una réplica por tratamiento). Las plantas seleccionadas se ubicaron cerca de cada recipiente de captura (Figura 1c). Del 24 al 28 de julio, se reforzaron las mediciones en tres puntos específicos de cada tratamiento, midiendo el flujo del tallo y la caída del agua en cuatro plantas por recipiente de captura. Estos puntos fueron el punto 1, 13 y 24 en el tratamiento CIS300, el punto 9, 18 y 24 en el tratamiento CIS200, y el punto 9, 13 y 24 en el tratamiento DPIS200 (Figura 1c).

En cada medición, se instalaron un colector de flujo del tallo y un colector de caída en cada punto. El agua que fluía por el tallo de la planta fue capturada utilizando un dispositivo de plástico que se fijó al tallo (Figura 2a). Este dispositivo consistía en la parte superior invertida de una botella de polipropileno con su tapa. Se hizo un corte vertical en forma de "V" en un lado de la botella para ajustarla alrededor del tallo, y se utilizó cinta impermeable para asegurar el colector al tallo.

El colector de flujo del tallo se instaló justo debajo de la última hoja activa, y se reforzó con clips (Figura 2a). Una pequeña manguera de plástico se pegó a un orificio en la tapa de la botella, y esta condujo el agua del flujo del tallo a un recipiente (Figura 2a). Por otro lado, el agua de la caída se recogió en un pluviómetro de plástico rectangular con un área de apertura de 0,120 metros por 0,385 metros (0,0462 metros cuadrados, Figura 2b). Se midió volumétricamente tanto el flujo del tallo como la caída.

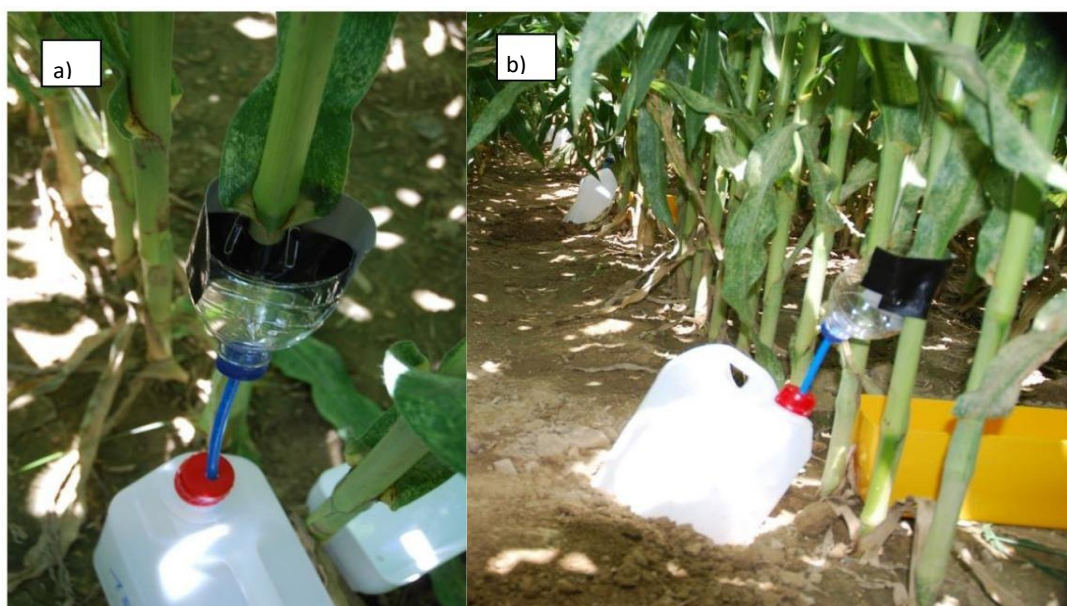


Figura 2. a) Dispositivo de medición Stemflow. b) Colectores Stemflow y Throughfall en una planta medida. Fuente: Zapata et al. (2018).

El volumen recolectado en los dispositivos de medición del flujo del tallo se convirtió en una profundidad en milímetros, asignando un área de 0,116 metros cuadrados a cada planta de maíz (0,155 metros por 0,75 metros, distancia entre plantas y distancia entre hileras, respectivamente). El volumen recogido en los dispositivos de caída se convirtió en una profundidad en milímetros, dividiéndolo por el área de apertura de estos dispositivos (0,0462 metros cuadrados). La precipitación debajo del dosel del maíz en cada punto de medición se obtuvo sumando el flujo del tallo y la caída.

Después de la etapa de espigado del maíz (27-28 de junio), se realizó la medición de la altura de las plantas utilizando una regla precisa con marcas en centímetros. Se distribuyeron uniformemente veinticinco puntos de medición en cada parcela experimental (Figura 1b). La altura promedio de las plantas en una parcela experimental se determinó tomando en cuenta todas las mediciones realizadas.

Para evaluar la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR, %) interceptada por el cultivo, se utilizó un ceptómetro de 1 metro de longitud equipado con 64 fotodiodos (Sunscan, Delta-T, Cambridge, Reino Unido) y un sensor PAR (BF3 Sensor de luz solar, Delta-T, Cambridge, Reino Unido). Este sensor PAR registraba de forma continua la radiación presente sobre el dosel del cultivo.

Además, se midió la radiación en la superficie del suelo en cada parcela experimental mediante la toma de 25 lecturas (Figura 1b) con el ceptómetro colocado de manera perpendicular a las hileras de plantas y moviéndolo a lo largo de las hileras de la parcela, cubriendo segmentos consecutivos de 1 metro de longitud. Estas mediciones se realizaron aproximadamente al

mediodía (12:00 GMT). La fracción de radiación PAR interceptada por el cultivo se calculó como el porcentaje resultante de la diferencia entre las lecturas del sensor BF3 y las lecturas del ceptómetro, en relación a las lecturas del sensor BF3.

La cantidad de radiación PAR interceptada por las plantas en cada parcela se determinó como el promedio de las 25 mediciones realizadas.

4.10 Caracterización de la técnica de distribución radial de agua:

Los resultados obtenidos utilizando la técnica de distribución radial de agua no concuerdan con los obtenidos mediante el disdrómetro. Ambas técnicas coinciden en los siguientes aspectos:

La cantidad de precipitación cerca del rociador es mayor a una altura de 2,00 m que a 1,00 m.

b) Las mayores diferencias de precipitación entre las distintas alturas de medición se observan en DPIS200.

Sin embargo, hay discrepancias entre ambos métodos en cuanto al tratamiento menos afectado por la elevación de medición. El disdrómetro indica que CIS200 es menos afectado, mientras que el catch-can radial experimento señala a CIS300.

Estas discrepancias podrían explicarse parcialmente por las diferencias en el área monitoreada. De hecho, el área de medición del catch-can es aproximadamente 3,7 veces mayor que la del disdrómetro.

La reducida área de medición del disdrómetro hace que esta técnica sea particularmente sensible a la velocidad del viento. En el método catch-can, las mediciones a diferentes alturas se realizan simultáneamente y, por lo tanto, bajo las mismas condiciones meteorológicas. Sin embargo, esto no ocurre en el caso del disdrómetro.

Aunque todos los experimentos se llevaron a cabo en condiciones de poco viento (inferior a 1,3 m/s), las condiciones meteorológicas durante los experimentos con el disdrómetro no fueron las mismas para las dos alturas de medición.

Dificultades para caracterizar la variabilidad del agua del suelo:

No se encontró una relación estadísticamente significativa entre el contenido de agua en el suelo, medido mediante análisis gravimétrico, antes y después de dos eventos de riego, y la cantidad de agua de riego aplicada sobre el dosel del cultivo de maíz, medida con latas de captura. La caracterización del contenido de agua en el suelo después del riego resultó ser complicada debido a la variabilidad a pequeña escala causada por la distribución irregular del agua de riego dentro del dosel del cultivo (Paltineanu y Starr, 2000 y Sánchez *et al.*, 2010).

En esta investigación, se realizaron mediciones gravimétricas en puntos ubicados entre las hileras del cultivo, representando cada punto de medición solo 0.0020 m². La baja representatividad espacial de las muestras de suelo no permite capturar la variabilidad espacial del agua disponible para el crecimiento del cultivo. Sería necesario realizar un muestreo de suelo más relevante en términos espaciales para superar estas limitaciones y obtener una referencia más precisa del contenido de agua en el suelo para lograr una irrigación uniforme en maíz cultivado bajo estructuras de protección.

4.11 Efecto de la elevación de la lata de captura en el rendimiento del riego

A medida que se incrementaba la elevación de la lata de captura por encima de los 2 metros, se observó una marcada disminución en el contenido de agua acumulado (CUac) y un significativo aumento en el déficit de agua acumulado (WDElac) para los tratamientos de baja presión, especialmente para DPIS200. Estos hallazgos son similares a los informados por Sánchez *et al.* (2010) y Stambouli *et al.* (2013) cuando la elevación de la lata de captura se incrementó de 0,85 a 2,00 metros. Roble *et al.* (2017) también reportaron una tendencia similar hasta una elevación de 2,00 metros, pero observaron una disminución en WDElac a medida que la elevación aumentaba de 2,00 a 2,30 metros, especialmente en tratamientos de baja presión.

Sin embargo, existen diferencias entre nuestro experimento y las referencias bibliográficas en términos de la elevación más alta de la lata de captura (0,35 metros más alta en nuestro estudio) y la altura de la boquilla del aspersor (0,20 metros más baja en nuestro estudio), lo que dificulta las comparaciones. Nuestros resultados concuerdan con investigaciones previas que indican que el uso de latas de captura sobre el dosel de cultivos altos (como el maíz) para estimar la eficacia del riego por aspersión (CU y WDEL) puede introducir incertidumbre cuando la elevación de las latas de captura se acerca a la altura de la boquilla del aspersor (Dogan *et al.*, 2008; Sánchez *et al.*, 2010; Robles *et al.*, 2017).

Por lo tanto, se debe tener precaución al diseñar experimentos de riego, teniendo en cuenta estas evidencias acumuladas.

4.12 Un dosel de maíz desarrollado modifica el rendimiento del riego

Los resultados presentados en este documento indican que aproximadamente el 20% del agua de riego que alcanza el dosel del cultivo se pierde por caída. Estas mediciones de caída mostraron una mayor variabilidad en comparación con las mediciones de flujo en el tallo. Martello *et al.* (2015) informaron que, en promedio, el 78% de la lluvia que cae debajo del dosel del maíz es interceptada por las hojas y se desplaza a lo largo del tallo (flujo en el tallo), mientras que solo el 22% llega directamente al suelo por caída. Hupet y Vanclooster (2005) reportaron coeficientes de variación superiores al 75% para las mediciones de caída realizadas debajo del dosel del maíz durante eventos de lluvia. Sol *et al.*

(2017) también informaron una importante variabilidad en las mediciones de caída debajo del dosel del maíz en su estudio.

El almacenamiento de agua interceptada por el dosel del maíz ha sido cuantificado entre 0,4 y 2,7 mm (Norman y Campbell, 1983; Steiner *et al.*, 1983; Martínez-Cob *et al.*, 2008). Según nuestros resultados, el almacenamiento de agua interceptada fue mayor en el tratamiento CIS300 que en los tratamientos de baja presión, probablemente debido a las diferencias en la distribución del tamaño de las gotas reportadas (Fig. 3).

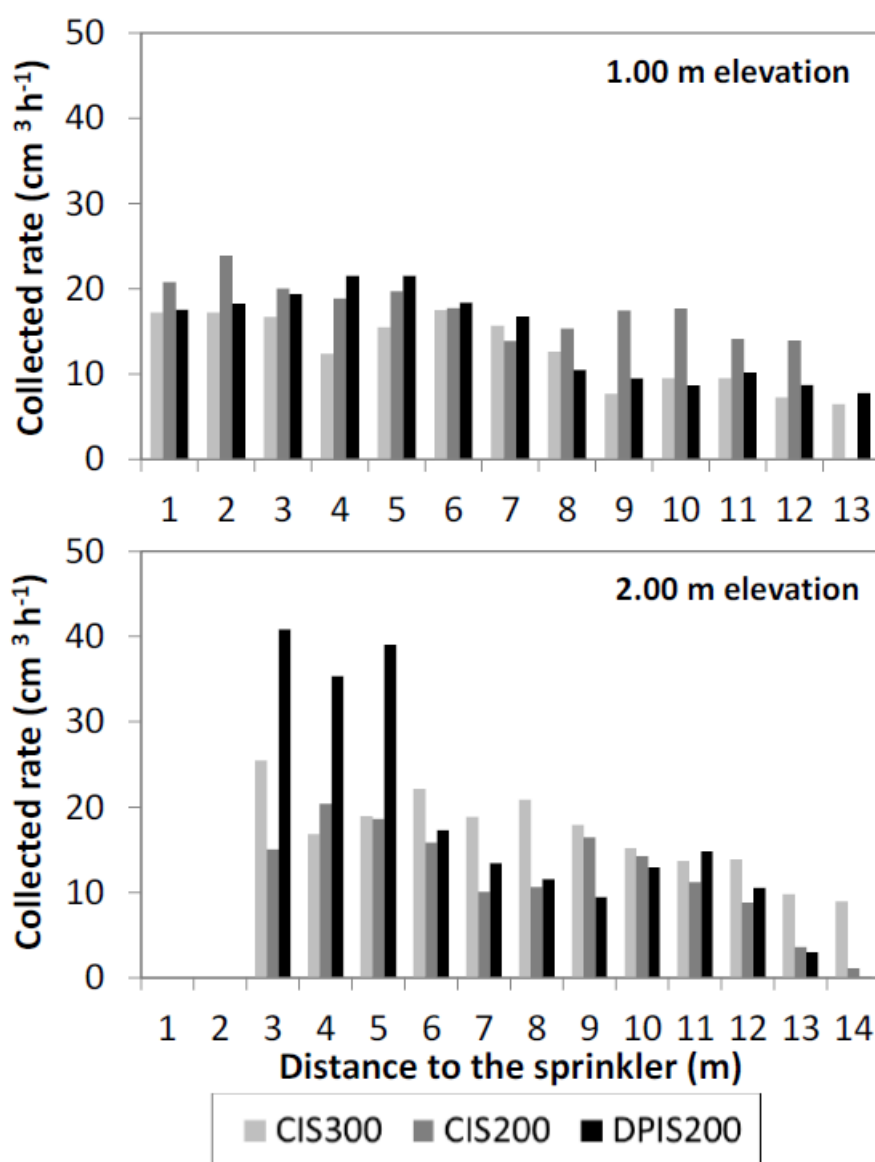


Figura 3. Número de gotas de diferentes diámetros a diferentes distancias de los aspersores de tratamiento ya dos alturas de disdrómetro (1,00 y 2,00 m). Fuente: Zapata *et al.* (2018).

Dorr *et al.* (2016) concluyeron que la retención de agua en las hojas de la planta disminuye a medida que aumenta el tamaño de las gotas. Además, las diferencias en el área de los recolectores utilizados encima (0,020 m²) y debajo

(0,116 m²) del dosel pueden afectar la confiabilidad de los datos, ya que los recolectores más grandes producen datos más confiables que los recolectores más pequeños

Desde la perspectiva del diseñador, los tratamientos de riego por aspersión de baja presión evaluados en este estudio, CIS200 y DPIS200, presentaron valores de uniformidad de la distribución del agua acumulada estacional (CUac_estacional) del 81% y 79%, respectivamente, que no alcanzaron el valor mínimo del 84% propuesto por Keller y Bliesner (1990).

Además, la diferencia en CUac a favor del tratamiento de alta presión (13% en 2017) sugiere que se puede esperar un rendimiento mayor para el tratamiento más uniforme. Roble *et al.* (2017) informaron hallazgos similares, pero no pudieron explicar por qué esta diferencia no tuvo efectos en el rendimiento del maíz.

En la práctica de la ingeniería, se supone que la uniformidad del riego es constante y una característica operativa del sistema. Sin embargo, este estudio proporciona evidencia adicional que indica que las estimaciones estándar de uniformidad por encima del dosel no necesariamente representan la variabilidad percibida por el cultivo.

De hecho, varios autores (van Wesenbeeck y Kachanoski, 1988; van Wesenbeeck *et al.*, 1988; Lamm y Manges, 2000; Li y Rao, 2000; Paltineanu y Starr, 2000; Canone *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2017) han informado que la arquitectura del dosel del cultivo juega un papel importante en la distribución espacial de la lluvia y el riego por aspersión.

Hemos observado diferencias entre los tratamientos en la partición del agua de riego en el dosel del maíz. Paltineanu y Starr (2000) también encontraron diferentes particiones de agua entre el riego por aspersión y la lluvia en el dosel del maíz para la misma tasa de precipitación. Además, Lamm y Manges (2000) informaron diferencias estadísticamente significativas en la partición del agua del dosel del maíz entre dos tipos de aspersores y diferentes presiones de trabajo (310 kPa y 103 kPa).

Estas diferencias en la partición se atribuyeron en esos estudios a los ángulos de intercepción del dosel y a la distribución del tamaño de gota. En nuestro estudio, hemos informado diferencias en el ángulo de intercepción y en la distribución del tamaño de gota, y ambas diferencias podrían contribuir a explicar las diferencias en la partición del agua en el dosel del maíz.

El CUac_estacional no proporcionó información precisa sobre la distribución del agua de riego recibida por el cultivo experimental. Nuestros resultados indican que la partición del agua mejoró la uniformidad de los tratamientos de baja presión y ligeramente disminuyó la uniformidad del tratamiento de presión estándar. Li y Rao (2000), en un experimento con trigo de invierno, informaron que cuando el CUac era inferior al 80% (una situación común en los tratamientos de baja presión), los valores de uniformidad de la distribución del

agua acumulada por debajo del dosel (CUbc) eran mayores que los valores de CUac.

También encontraron las discrepancias significativas en los valores de CUac (10% en 2016 y 13% en 2017) entre los tratamientos a diferentes presiones de riego se redujeron considerablemente (3-5% para ocho eventos de riego) al medir la uniformidad debajo del dosel del maíz. Se observó una tendencia similar en WDEL: las diferencias entre los tratamientos disminuyeron cuando se estimaron las pérdidas debajo del dosel del maíz. El incremento en el rendimiento del riego, como resultado del paso del agua de riego a través del dosel del maíz, puede explicar la falta de diferencias en el rendimiento del grano de maíz entre los tratamientos.

5. Fundamentos teóricos

5.1 Definición de la terminología a utilizar

Los principales parámetros en todos los procedimientos de evaluación son:

-Déficit de humedad del suelo (DHS): Es la sequedad del suelo en la zona radicular. Se expresa en mm de altura de lámina de agua y es igual a la cantidad de agua que debe ser aplicada con el riego en condiciones normales.

-Déficit permisible de manejo (DPM): Es la altura de agua que es extraída en la zona radicular entre riegos consecutivos. Representa el valor de DHS en el momento del riego.

-Uniformidad de distribución (UD): Es un indicador de la uniformidad de altura de agua infiltrada en la parcela.

$$UD = \frac{\text{Altura media de agua infiltrada en el 25\% del área regada}}{\text{Altura media de agua infiltrada en la parcela}}$$

Según Merriam y Keller (1978), la uniformidad de distribución del sistema (UDs) es:

$$UDs = UD * 0,25 * \left[1 + 3 \left(\frac{Pn}{Pa} \right)^{0,5} \right]$$

Pn= presión mínima en un aspersor del bloque de riego

Pa= presión media de los aspersores del bloque

-Eficiencia de aplicación referida al 25% de las observaciones más desfavorables (EA)

$$EA = \frac{\text{Media del 25\% de los valores más bajos de la altura infiltrada y almacenada en la zona radicular}}{\text{Altura media de agua aplicada}}$$

Cuando la media del 25% sobrepasa el valor de DHS, el numerador anterior es igual al DHS.

Un valor bajo se puede deber a una mala uniformidad de distribución del agua como a un riego excesivo.

-Eficiencia potencial de aplicación referida al 25% de las observaciones más desfavorables (EPA):

$$EPA = \frac{\text{Altura media infiltrada en el 25\% de las observaciones más desfavorables cuando es igual al DPM}}{\text{Altura media de agua aplicada para satisfacer el DPM}}$$

La diferencia entre la EPA y la EA es la medida de los problemas de manejo del riego. Por ejemplo, un valor bajo de la EPA indica diseños de riego ineficientes y de la EA la existencia de problemas de manejo.

-Coeficiente de uniformidad:

$$CU = (1 - \frac{\sum d}{M n})^{100}$$

M= Valor medio del agua recogida en los pluviómetros

n= Número total de pluviómetros

$\sum d$ = Suma de los valores absolutos de las desviaciones de cada pluviómetro

$$\text{Coeficiente de uniformidad del sistema} = CU * 0,5 * [1 + (\frac{P_n}{P_a})^{0,5}]$$

Relación con la UD= $CU = 1 - 0,63 (1 - UD)$

El coeficiente de uniformidad utilizando los sistemas pivote es:

$$CU = [1 - \frac{\sum D_i (C_i - \frac{\sum_{i=1}^n C_i D_i}{\sum_{i=1}^n D_i})}{\sum_{i=1}^n C_i D_i}]^{100}$$

n=Número de pluviómetros

Ci= Cantidad recogida por el pluviómetro

Di= Distancia del centro pivote al pluviómetro o posición ocupada por el pluviómetro, con un valor de 1 para el más cercano, 2 al siguiente y así hasta el más alejado.

-Coeficiente de variación:

$$CV = \sigma / M$$

$$CU = 1 - 0,8 CV \quad (CV < 0,5)$$

$$UD = 1 - 1,3 CV \quad (CV < 0,25)$$

Si se toma como DN la media del 25%, un octavo del área regada recibe menos agua que la mínima deseada. Otro caso sería si se toma como DN la media del 50%, donde el ¼ del área regada recibe menos de la media mínima.

Para que esta eficiencia sea práctica económicamente, el área menos regada debe ser pequeña pero mayor que 0.

5.2 Eficiencia de riego

Del agua que se aplica en un riego, mucha se pierde por evaporación o escorrentía. Se puede representar mediante diagramas que nos indiquen que hay zonas que reciben más aguas que otras, donde nosotros podemos decidir que fracción de área queremos que esté bien regada.

En los diagramas mencionados anteriormente, aparecen los siguientes conceptos:

Hr=Dn: es la altura de agua para reponer el déficit de agua en el suelo.

Hp: es la altura media de agua percolada en el área sobrerregada.

Hd: es la altura media de agua que representa el déficit en el área infrarregada.

Hn: altura de agua aplicada que queda almacenada en la zona radicular

Hba: es la altura de agua aplicada al terreno. Se cumple que $Hba = Hn + Hp$.

La calidad del riego se define en función de:

- Rendimiento de aplicación: $Ra = Hn/Hba$
- Coeficiente de déficit: $Cd = Hd/Hr$, $Cd = 1 - Fa$
- Factor de disponibilidad: $Fa = Hn/Hr$
- Eficiencia de distribución: $Eda = Hr/Hba$
- $Hr = Hn + Hd$

La producción máxima solo se alcanzará si $Cd=0$.

5.3 Eficiencia general de aplicación en riego por aspersión

Se debe tener en cuenta una eficiencia de aplicación que incluya los efectos de las pérdidas por falta de uniformidad en la aplicación, la evaporación y la percolación profunda. Esta eficiencia debe ser específica para un determinado porcentaje de área que reciba la dosis neta deseada ($Db = Dn/Ea$).

Utilizando agua salina, se calcula como: $Db = \frac{0,9 Dn}{Ea (1-LR)}$

Para diseñar un sistema, la Ea se puede calcular como:

$$Ea = Eda Pe Pd$$

Eda= Eficiencia de distribución para el porcentaje deseado "a" de área bien regada

Pe= Proporción efectiva del agua emitida por los aspersores que llega a la superficie

Pd= Proporción de agua descargada por los aspersores respecto a la total bombeada por el sistema.

5.4 Eficiencia de la distribución(Eda)

$$Eda = \frac{\text{Altura neta mínima recibida por la fracción "a" del área mojada}}{\text{Altura media recibida por el área total}}$$

Para obtener la Eda en función de "a" y CU se utiliza la siguiente ecuación:

$$Eda = 100 + (606 - 24,9 a + 0,349 a^2 - 0,00186 a^3)(1 - CU/100)$$

Por ejemplo, para un sistema de aspersión tiene un CU= 86%, se tiene $ED_{80}= 85\%$ para un porcentaje de área bien regada de un 80% (mirando en la tabla de parámetros para el diseño del riego por aspersión). Por lo tanto, por cada mm de agua que recibe el cultivo, el 80% del área regada recibirá el 85% de la altura media aplicada y el 20% restante recibirá menos de ese 85%.

En este caso, la altura media aplicada es 1,18 mm (1/0,85). Se necesita más agua cuando el CU es menor.

Para cultivos de valor medio se recomienda que el 90% del área quede bien regada, los cultivos de menor valor se recomienda un 80%.

Ramales móviles: UD= 60-80% CU=70-86%

Ramales fijos: UD= 60-85% CU= 70-88%

Cañones de riego: UD=50-60% CU= 60-75%

5.5 Pérdidas por evaporación y arrastre por el viento:

Según Merriam y Keller (1978), estas pérdidas varían entre el 5 y el 10%, sin embargo pueden ser considerablemente mayores.

Otra fuente como es Heerman y Hein (1968) indican que es de alrededor de un 1-2% del agua descargada en función del tamaño de la gota y las condiciones atmosféricas.

La estimación de la proporción efectiva del agua que llega al suelo puede calcularse mediante:

$$Pe = 0,976 + 0,005 ETP - 0,00017 (ETP * ETP) + 0,0012 V - IG(0,00043 ETP + 0,00018 V + 0,000016 ETP V)$$

Pe= proporción efectiva del agua emitida por los aspersores que llega a la superficie del suelo

ETP= Evapotranspiración potencial

V= Velocidad del viento

IG= $0,032 P^{1,3}/B$ (índice de grosor de gota)

P= Presión de funcionamiento de la boquilla

B= Diámetro de boquilla

5.6 Pérdidas por fugas en conducciones:

Estas pérdidas pueden ser menores al 1% del caudal transportado, siendo la proporción entre el agua descargada por los aspersores y la bombeada estará entre $0,99 < Pd < 1,0$.

En cambio en instalaciones con un mantenimiento insuficiente, las pérdidas pueden superar el 10%.

5.7 Terminología en la aplicación del agua

En cuanto a este aspecto, se utilizan los conceptos de CU,UD y EPA que se definen como:

$$UD = \frac{\text{Altura media recogida en el 25\% de los pluviómetros que menos recogen}}{\text{Altura media de agua recogida en los pluviómetros}} * 100$$

$$EPA = \frac{\text{Altura media recogida en el 25\% de los pluviómetros que menos recogen}}{\text{Altura media de agua aplicada en los pluviómetros}} * 100$$

Las pérdidas durante el proceso de riego incluyen:

- La evaporación y el arrastre de las gotas por el viento.
- El agua que cae fuera del área cubierta por los pluviómetros.
- La evaporación que exista en los pluviómetros.

Las pérdidas por evaporación en el aire pueden variar entre 1 o 2% del agua descargada y son menores por la noche que por el día. El 60% de estas pérdidas son por evaporación y el 40% es por arrastre del viento. El valor obtenido se debe considerar como una aproximación, en el cual puede haber un error de un 5% más o menos.

Algunos factores que afectan a la uniformidad del reparto del agua se pueden compensar en sucesivos riegos o se pueden intensificar. En los sistemas pivote algunos de los factores son la falta de uniformidad en la velocidad de desplazamiento del equipo, funcionamiento defectuoso de algún aspersor o la existencia de escorrentía.

En coberturas totales, los factores que se pueden compensar son la distorsión producida por el viento sin dirección dominante y los que se intensifican sería el funcionamiento defectuoso de algún aspersor.

En sistemas semifijos de ramales móviles estarían:

- La falta de uniformidad en el funcionamiento de aspersores en sistemas que se mueven de forma secuencial (variación en la velocidad de rotación, irregularidad en el ángulo de descarga del aspersor.
- La falta de uniformidad en la duración de posturas de riego en sistemas con ramales móviles se compensa en los riegos siguientes, incluso la distorsión provocada por el viento.

Los factores que tienden a acumular su efecto sobre la uniformidad son:

- Las diferencias en el caudal descargado por los aspersores debido a las diferencias en la elevación del terreno.
- La mala distribución del agua en los bordes del campo.

5.8 Evaluación de sistemas de aspersión estacionarios

Los aspersores permanecen fijos. En esta evaluación, solo se contempla el proceso de aplicación de agua por el sistema y no se tienen en cuenta los aspectos de manejo que regulan la adecuación del riego.

5.8.1 Datos recogidos en la evaluación

Consiste en las características del aspersor utilizado, duración de la prueba, altura del tubo portaaspersor, medida del volumen de agua recogida en la red de pluviómetros, caudal descargado por los aspersores que mojan la red de pluviómetros, etc.

Los pluviómetros no dan una reproducción exacta de la realidad, debido a que el área de pluviómetros es pequeña comparándola con la superficie del suelo, hay pérdidas por evaporación en los pluviómetros y el viento puede arrastrar gotas de agua fuera de la zona muestreada por los pluviómetros y alterar la recogida de agua.

5.8.2 Equipo necesario

- Manómetro de aguja en baño de glicerina acoplado a un tubo de Pitot.
- Cronómetro con una precisión de 1/100 segundos.
- Depósito de volumen de 10 a 20 l.
- Dos mangueras flexibles de 20 mm y 2,5 m de longitud.
- Probetas graduadas en unidades de 1 cm³.
- Cintas métricas de 25 m y de 2m.
- Calibre de precisión.
- Veleta y anemómetro y trípode.
- De 50 a 100 pluviómetros cilíndricos, con los bordes de su abertura agudos y sin deformación. Su colocación en campo debe ser vertical. Se recomienda que la altura sea como mínimo el doble de la altura media de agua recogida.

5.8.3 Procedimiento de campo

Para obtener los datos en las fichas de ensayo, se puede seguir estos pasos:

- Elegir la zona central del bloque de riego y donde las presiones sean muy parecidas a las de diseño del sistema. En el ramal se tomara la zona más cercana al 35% de su longitud desde el origen.
- Parar la rotación de los aspersores, dirigiendo el chorro a zonas donde no estén los pluviómetros.
- Colocar red de pluviómetros a un marco que no sea mayor a 3x3 m y que queden verticales.
- Comprobar el espaciamiento entre aspersores y ramales y anotar la pendiente y el diámetro.
- Comprobar los aspersores: marca, modelo y diámetros de las boquillas.
- Medir la presión y el caudal descargado mediante una manguera flexible, un recipiente de volumen y un cronómetro.
- Medir la altura de tubo portaaspersor y comprobar su verticalidad.
- Soltar los aspersores y anotar la hora, previo a esto vaciar los pluviómetros.
- Medir la presión en los aspersores de origen y en el extremo de las líneas.
- Medir la velocidad y dirección del viento.
- Colocar un pluviómetro fuera de la zona de ensayo con la cantidad de agua que recogerá la red de pluviómetros para saber el volumen de agua perdido por evaporación.
- Medir la presión y anotar la hora al acabar.
- La duración del ensayo debe ser parecida a la de un riego real para conseguir el efecto total del viento y evaporación.

- Medir los volúmenes recogidos en el pluviómetro.
- Medir la velocidad de giro de los aspersores.
- Si hubiera un solo ramal, los resultados de pluviometría de la parte derecha se pueden solapar con los de la izquierda.

5.8.4 Obtención de los parámetros de evaluación

A partir de los datos obtenidos en el ensayo calcularemos diferentes valores.

Los parámetros obtenidos se obtendrán entre dos aspersores del lateral, es decir, se tendrán que calcular dos veces en cada ensayo. Si no se utilizan reguladores de presión, las variaciones de esta puede hacer que la uniformidad del sistema sea menor que en el área de ensayo.

$$UDs = UD * 0,25 * [1 + 3 \left(\frac{Pn}{Pa} \right)^{0,5}]$$

$$CUs = CU * 0,5 * [1 + \left(\frac{Pn}{Pa} \right)^{0,5}]$$

Pn= presión mínima en un aspersor del bloque de riego

Pa= presión media de los aspersores del bloque

Pa es siempre conocida y Pn se puede calcular a través de los datos de pérdida de carga.

5.9 Evaluación de equipos pivote

Se aprovechan los primeros estados de desarrollo del cultivo para no interceptar la recogida de agua en pluviómetros. Si no se puede de esta manera, se usa el camino de acceso al centro pivote para realizar el ensayo.

5.9.1 Datos recogidos durante la evaluación

- Marca del equipo
- Longitud del lateral
- Velocidad de desplazamiento y tiempo empleado en dar una revolución
- Anchura de la franja mojada en el extremo móvil y tiempo de aplicación de agua en esa zona.
- Presión en el origen y en el extremo del lateral
- Caudal de entrada al equipo
- Volumen de agua recogida en los pluviómetros y número de posición de cada uno de ellos.
- Diferencia de elevación entre el punto pivote y los puntos altos y bajos del campo y a lo largo de la línea de posición de la prueba.
- Velocidad y dirección del viento durante el ensayo.

5.9.2 Equipo necesario

- Un cronómetro, un manómetro portátil y dos cintas métricas de 25m y de 2m.
- De 100 a 150 pluviómetros con una altura de 8 a 10 cm y un diámetro de recogida de 8 cm.
- Una probeta, graduada en unidades de 1 cm³.

- Una veleta, un anemómetro y un trípode a una altura de 2 a 2,5 m.

5.9.3 Forma de proceder en el campo

- Elegir la zona de ensayo: Cuando el cultivo tenga porte alto, el ensayo se realizara en el camino de acceso al centro pivote. Donde el cultivo tenga porte bajo se dará en una posición con el mínimo de diferencia de cotas.
- Medir la separación entre torres aprovechando el camino de acceso al centro pivote.
- Colocar el anemómetro en el trípode y anotar la lectura y la hora. Repetirlo cada 10-15 minutos.
- Disponer los pluviómetros en hilera con un espaciamiento entre 5 y 6,5 m, de esta manera no es necesario que los pluviómetros sigan una línea recta. Según algunos autores, con una línea de pluviómetros es suficiente para caracterizar su modelo de distribución. Sin embargo, Ring y Heermann (1978), recomiendan dos líneas radiales separadas con un espaciamiento de 3m.

La separación entre pluviómetros depende del grado de exactitud deseado.

Se prescindirá de los primeros pluviómetros adyacentes al centro pivote, sin que se produzcan efectos adversos en la evaluación.

Se asignará un número de orden a la localización de cada pluviómetro comenzando desde el centro pivote para simplificar el proceso de captación de datos. El espaciamiento se obtiene dividiendo la longitud del tramo entre torres por un número entero. Posteriormente se colocarán las filas de pluviómetros por delante del frente mojado, colocando el primer pluviómetro a una distancia de la huella igual a la mitad del espaciamiento.

- Medir la velocidad media de desplazamiento de la última torre. En el momento que se para la torre, se miden 10 m y se coloca una señal en el punto correspondiente y se cronometra el tiempo que tarda en recorrerlos.
- Medir la anchura de la franja mojada en la zona del extremo.
- Medir la longitud del alero y la distancia de la última torre al borde para deducir la longitud del aparato y el radio regado.
- Se colocarán dos pluviómetros con la cantidad de agua que recogerán los pluviómetros para hacer una estimación de las pérdidas por evaporación.
- Medir la presión en emisores próximos a la última torre y comprobar sus características.
- Volver al centro pivote y medir la presión del mismo.
- Medir el caudal de entrada al pivote. Se anotará el volumen cada 10 minutos. En el caso de que haya una balsa, se llenará y se pararán las bombas excepto la de suministro al pivote ensayado, se medirá el descenso del nivel del agua.
- Medir la presión a la salida de la bomba como las características de esta.

- Medir el volumen de agua recogido en los pluviómetros , empezando por los que están al borde de la parcela. Medir uno de los pluviómetros de evaporación cuando se llegue a la mitad de la longitud del equipo y el otro cuando termine la recogida de agua de los pluviómetros. En la ficha de ensayo se localizara la posición de las torres. El radio correctamente regado coincidirá con la longitud del equipo.
- Medir la lectura del anemómetro y la hora al final del ensayo.

5.9.4 Obtención de los parámetros de evaluación

Los volúmenes han de ser ponderados, esta ponderación se consigue multiplicando el volumen recogido por el número de posición asignado al pluviómetro.

Para determinar la media ponderada del 25%, se utiliza un número de pluviómetros que representan a los $\frac{1}{4}$ que menos recogen dentro del área regada. La selección de estos se realiza escogiendo los volúmenes crecientes y manteniendo los números de posición hasta que sume alrededor de $\frac{1}{4}$ de la suma de los números de posición de todos los pluviómetros. La media ponderada de los $\frac{1}{4}$ pluviómetros que menos volumen recogen se obtiene dividiendo la suma de los volúmenes ponderados por la suma de los números de posición.

- La uniformidad de distribución será:

$$UD = \frac{\text{Media ponderada de los volúmenes del 25\% de pluviómetros que menos recogen}}{\text{Media ponderada de los volúmenes recogidos}}$$

Cuando la UD es pequeña, se pueden diferenciar las áreas con problemas, emisores mal situados o funcionando mal.

- *La altura media aplicada por revolución* se calcula por el número de horas por revolución(n) , el caudal de entrada al sistema(Q) y el área mojada(S):

$$H\left(\frac{mm}{rev}\right) = \frac{Q\left(\frac{L}{H}\right) n\left(\frac{h}{rev}\right)}{S(m^2)}$$

- La eficiencia potencial de aplicación del sistema EPA:

$$EPA = \frac{\text{Altura media ponderada del 25\% de pluviómetros que menos recogen}}{\text{Altura media aplicada}}$$

5.10 Uniformidad circular

La uniformidad circular es una medida de la uniformidad de aplicación a lo largo de coronas circulares concéntricas a una distancia constante del dentro pivote. Una localización idónea para medir esta uniformidad es a lo largo de una corona circular de radio $2L/3$ (L= longitud del ramal).

La prueba para realizar adecuadamente la selección de las boquillas se tiene que realizar con viento en calma y en horas de poca evaporación.

Para calcular los datos de campo, los pluviómetros se colocan a unos 30 m en la zona que más se acerque a $2L/3$ y se recomienda poner dos filas separados de unos 5m. Para llevar a cabo la evaluación, se tiene que aplicar una dosis de unos 15 mm y la lectura de los pluviómetros se deben hacer nada más terminar de pasar el equipo.

Los valores de uniformidad conjunta se deben determinar como:

$$UDp = UDr \left(\frac{UDc}{100} \right)$$

$$CUp = CUr \left(\frac{CUc}{100} \right)$$

6. Metodología

6.1 Presentación:

La parcela se encuentra en la provincia de Huesca, en el municipio de Sangarrén. La comunidad de regantes de esta zona es la del Molinar del Flumen, aunque de forma más generalizada pertenece a la comunidad de Riegos del Alto Aragón, que toma las aguas de los ríos Gállego y Cinca.

La superficie total de la parcela destinada al trabajo es de 37,7394 hectáreas, considerando la adición de dos parcelas contiguas a la representada en la imagen. No obstante, la parcela específica en la que se llevará a cabo el trabajo es aquella señalada en la figura 4, la cual posee una dimensión de 23,0346 hectáreas.

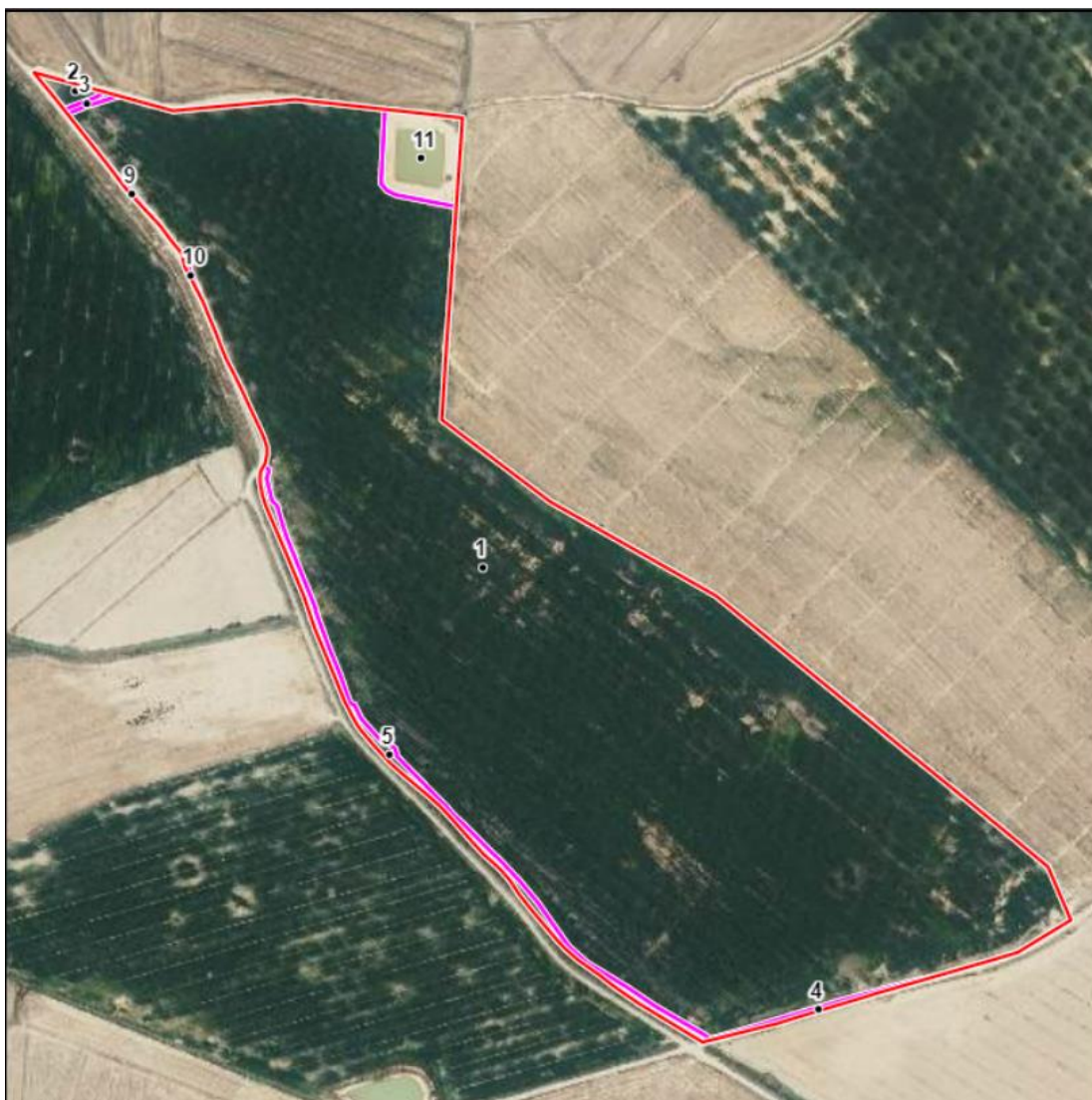


Figura 4. Vista aérea de la parcela. Fuente: Visor SigPac.

Se ha establecido una balsa como fuente de agua para su posterior uso en el campo. Las dimensiones de esta balsa son de 0,4429 hectáreas, con una capacidad de 4000 m³ y se encuentra completamente cercada. La construcción de la balsa se llevó a cabo debido a la ausencia de hidrantes, ya que la modernización ha sido implementada pero aún no se han instalado los hidrantes por parte de la comunidad de regantes del Molinar del Flumen. Por lo tanto, resulta fundamental instalar la balsa para garantizar el suministro de agua a esta parcela y asegurar así la producción. La balsa fue construida en el año 2019 y hasta el día de hoy los hidrantes aún no han sido instalados, por lo que su construcción resultó necesaria para poder obtener producción durante estos años. Además, es importante mencionar que, tras el primer año de funcionamiento de la balsa, esta ya ha sido completamente amortizada.

El flujo de agua es dirigido hacia la balsa a través de una canaleta y se regula mediante un volante, permitiendo ajustar el caudal que llega a la balsa. Esta función resulta de suma importancia, especialmente en situaciones donde el

nivel de agua en la balsa alcanza niveles elevados y existe el riesgo de desbordamiento. En tales circunstancias, es fundamental tener precaución y determinar con precisión la cantidad de agua que debe ingresar para evitar cualquier problema.

Para evitar el desbordamiento de la balsa, se ha implementado una medida adicional que consiste en la instalación de una boya. Esta boya tiene la función de alertarnos cuando el nivel del agua supere el límite establecido, indicando que el nivel es superior al habitual. La figura 5 ilustra dicha boya.

Con el fin de proporcionar una notificación instantánea de estas situaciones, se ha empleado una aplicación denominada AgronicApp. Esta aplicación tiene la capacidad de enviar alertas cuando el nivel de agua excede la boya, y ofrece diversas funciones adicionales. Una de ellas es mostrar la presión en el volante utilizada para regular el riego, lo cual resulta fundamental para obtener datos precisos sobre los resultados obtenidos en el campo.

Además, la funcionalidad más destacada de AgronicApp es la posibilidad de encender o apagar el motor responsable de impulsar el agua de forma remota, sin necesidad de desplazarse al lugar físico. Esto permite un mayor control y comodidad en la gestión del riego. Asimismo, la aplicación puede detectar y notificar cualquier anomalía que se presente durante el riego, así como cualquier incidencia que ocurra durante este período. De esta manera, se garantiza una pronta respuesta y solución ante cualquier contratiempo que pueda surgir.

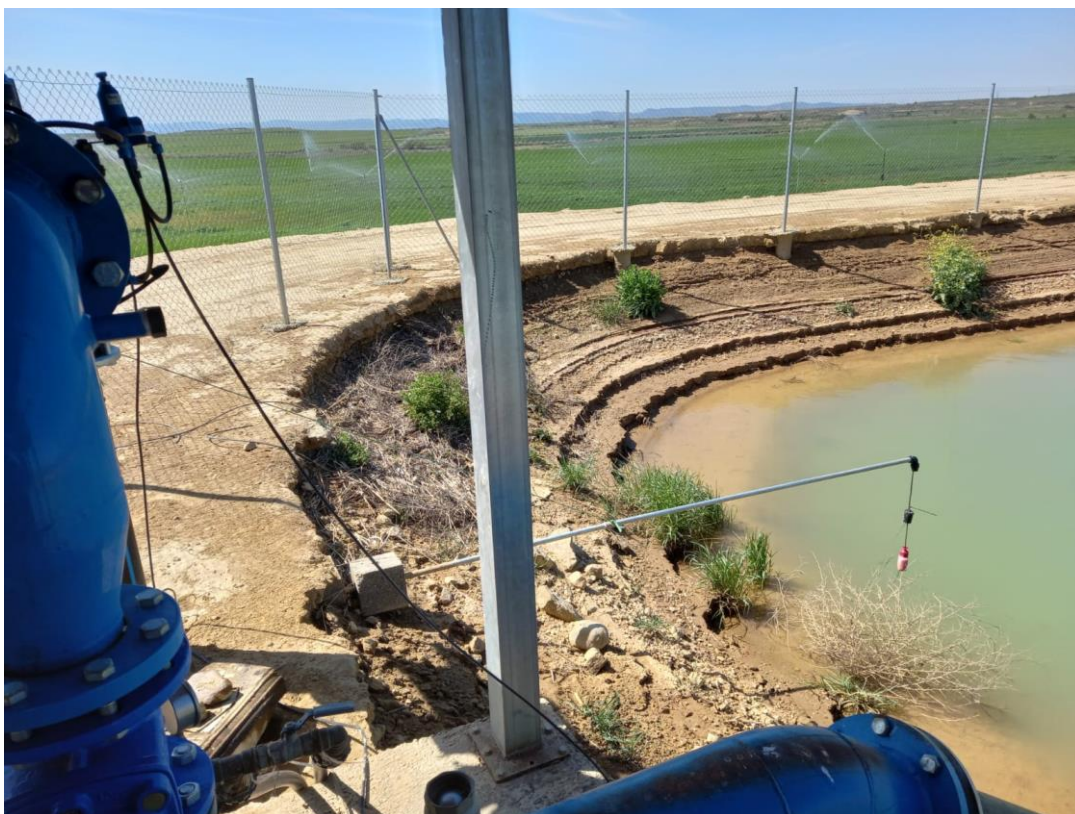


Figura 5. Vista de la balsa y de la boya. Fuente: Elaboración propia.

El método utilizado para transportar el agua al campo se llevará a cabo mediante la utilización de un sistema motorizado, similar al de la figura 6, estratégicamente ubicado junto a la balsa y resguardado dentro de una estructura segura para prevenir cualquier intento de hurto. Este sistema se basa en un motor de alta eficiencia, compuesto por cuatro cilindros y equipado con tecnología de turboalimentación. Para asegurar un rendimiento óptimo, se ha incorporado una bomba Caprari de campana con soporte. Además, se ha instalado un acoplamiento elástico, que garantiza un funcionamiento suave y preciso. El punto de operación de este sistema está diseñado para abastecer aproximadamente 220 metros cúbicos por hectárea, superando un desnivel de 47 metros de columna de agua. Esto se logra manteniendo el motor en un régimen de 1700 revoluciones por minuto, lo que contribuye a un desempeño eficiente y constante.



Figura 6. Vista del motor de arranque .Fuente: Elaboración propia.

El encendido del sistema se lleva a cabo mediante un cuadro de arranque, el cual cuenta con una llave de contacto que permite su activación. A su vez, el arranque puede realizarse de forma manual o automática, según se prefiera.

Es imprescindible contar con un depósito de gasolina, ya que este combustible es necesario para el funcionamiento del motor que impulsa el sistema de riego.

Por último, se disponen de datos técnicos relevantes acerca de los aspersores presentes en el campo. Estos datos incluyen información acerca del material

utilizado en su fabricación, las boquillas empleadas y el caudal con el que se realiza el riego. Estos detalles técnicos resultan fundamentales para un adecuado manejo y control del sistema de riego.

6.2 Características técnicas de los aspersores.

En la tabla 1 viene representado las características técnicas de los aspersores de la parcela, se adjunta a continuación:

Marco	18 x 18	Tresbolillo
Superficie cubierta por aspersor	324	m ²
Caudal de aspersor	1900	l/h
Pluviometría	5,86	l.m ² /h
Número de horas por postura	2,67	Horas.
Dosis de riego	15,65	l.m ²
Número total de módulos	18	Uds.
Número de módulos en funcionamiento	2	Uds.
Número total de posiciones	9	Uds.
Ciclo de riego	24	Horas.
Número de aspersores por módulo	50	Uds.
Número de aspersores en funcionamiento	100	Uds.
Superficie regada al día	22,42	Ha
Caudal necesario	45	l/s
Número de tomas en finca	1	Uds.
Presión en toma	50	m.c.a.
Material	LATÓN	
Boquilla	4,8 X 2,38	mm.
Caudal	1900	l/h
Presión en boquilla	3	Kg./cm ²
Alcance del aspersor	14,5	m.

Tabla 1. Datos de la instalación de riego por aspersión en la parcela que se trabaja. Fuente: Hyrasa Hidráulica y Riego por Aspersión.

6.3 Procedimientos:

La adecuada gestión del agua implica un manejo óptimo de las redes de distribución y del proceso de aplicación de agua, así como la implementación de técnicas de programación de riegos que nos guíen en cuanto al momento y la cantidad precisa para cada riego. Este enfoque garantiza una utilización eficiente y responsable de los recursos hídricos, maximizando los beneficios obtenidos y minimizando el desperdicio. Al seguir estos principios, podemos lograr un uso sostenible del agua, contribuyendo así a la conservación del medio ambiente y la seguridad alimentaria.

Los procesos de evaluación desempeñan un papel fundamental al proporcionarnos una comprensión profunda de los parámetros que intervienen en la aplicación del agua. A través de ensayos de campo y análisis detallados, es posible determinar los ajustes y modificaciones necesarios para mejorar el proceso de riego, logrando así ahorros significativos en agua y energía, así como mejoras en los rendimientos de los cultivos.

Estos procesos de evaluación son de suma importancia, ya que permiten seleccionar el sistema de riego más adecuado en función de las condiciones específicas de cada área de riego. Al considerar aspectos como la disponibilidad de agua, la calidad del suelo, el clima y otros factores relevantes, se pueden tomar decisiones informadas que maximicen la eficiencia y los resultados en términos de productividad agrícola.

En resumen, los procesos de evaluación son herramientas esenciales que nos brindan la capacidad de optimizar el manejo del riego, buscando constantemente la mejora continua y el uso eficiente de los recursos, en aras de promover la sostenibilidad y el éxito en la agricultura.

La cuestión de lograr una utilización eficiente del agua no suele contar con una solución instantánea, y las mejoras implementadas pueden ser relativamente sencillas en algunos casos, como ajustar la presión de trabajo o modificar el tamaño y número de las boquillas utilizadas.

Es importante tener en cuenta que, aunque las soluciones puedan parecer simples, su impacto puede ser significativo en términos de conservación y aprovechamiento del agua. Pequeños ajustes en la presión de trabajo pueden reducir el consumo de agua sin comprometer el rendimiento de los cultivos. Asimismo, modificar el tamaño y número de boquillas puede optimizar la distribución y uniformidad del riego, asegurando una aplicación más precisa y eficiente.

Aunque estas mejoras pueden parecer sencillas, requieren de un enfoque cuidadoso y una evaluación continua para garantizar que se ajusten adecuadamente a las necesidades específicas de cada situación. La implementación de tales mejoras representa un paso importante hacia una gestión responsable del agua en la agricultura, contribuyendo a la conservación de los recursos y a la sostenibilidad a largo plazo.

Una vez mencionada la teoría, en la práctica se llevarán a cabo tres ensayos. El primero, llevado a cabo sin contratiempos permitió calcular todos los parámetros necesarios. Los recipientes recolectaron cantidades uniformes y coherentes a lo largo de toda la zona de estudio. Además, se efectuó un segundo ensayo algunos días después; no obstante, este presentó inconvenientes debido a que el terreno aún se encontraba demasiado húmedo y los recipientes, rodeados de agua durante el riego, flotaron y se desplomaron. Por consiguiente, se tomó la decisión de esperar más de tres días antes de realizar el siguiente ensayo, con el fin de que el terreno se secase por completo y se pudiera proceder sin impedimentos. Este último ensayo resultó exitoso, y transcurrió sin ningún contratiempo. Por último, el ensayo final también fue exitoso, y se llevó a cabo de manera más eficiente en cuanto al tiempo, dado que ya se contaba con la experiencia adquirida en los tres ensayos anteriores.

Para llevar a cabo los ensayos pertinentes, es imperativo seleccionar con sumo criterio una zona precisa dentro de la parcela, cuya delimitación se encuentre regida por las características inherentes de la misma. Asimismo, se hace indispensable ejecutar el riego en el momento en que las condiciones de humedad equivalgan a las propias de un riego convencional.

En el presente caso, que corresponde al riego por aspersión, la evaluación se llevará a cabo a través de una red de vasos distribuidos estratégicamente en el terreno, tal y como se representa en la figura 7. Dicha evaluación comprenderá la medición de diversas variables, entre las que se destacan el tipo de aspersor empleado, la presión ejercida en el mismo, el caudal de agua suministrado, entre otras consideraciones relevantes.



Figura 7. Ubicación de los recipientes en la zona de riego. Fuente: Elaboración propia

Tal como se ha constatado previamente, en la parcela se ha implementado un patrón de disposición de los aspersores en forma de tresbolillo. De este modo, se procederá a seleccionar con cautela la zona para la realización de los ensayos, la cual estará ubicada en las proximidades de la balsa, tal y como se indica en la figura 8. La elección de esta ubicación se fundamenta en su conveniencia debido a su cercanía, lo cual facilitará en gran medida el transporte sin esfuerzo adicional del material necesario para llevar a cabo el mencionado ensayo.



Figura 8. Vista del área regada. Fuente: Elaboración propia.

La disposición de los recipientes en el área de estudio se llevará a cabo según el esquema de la figura 9.

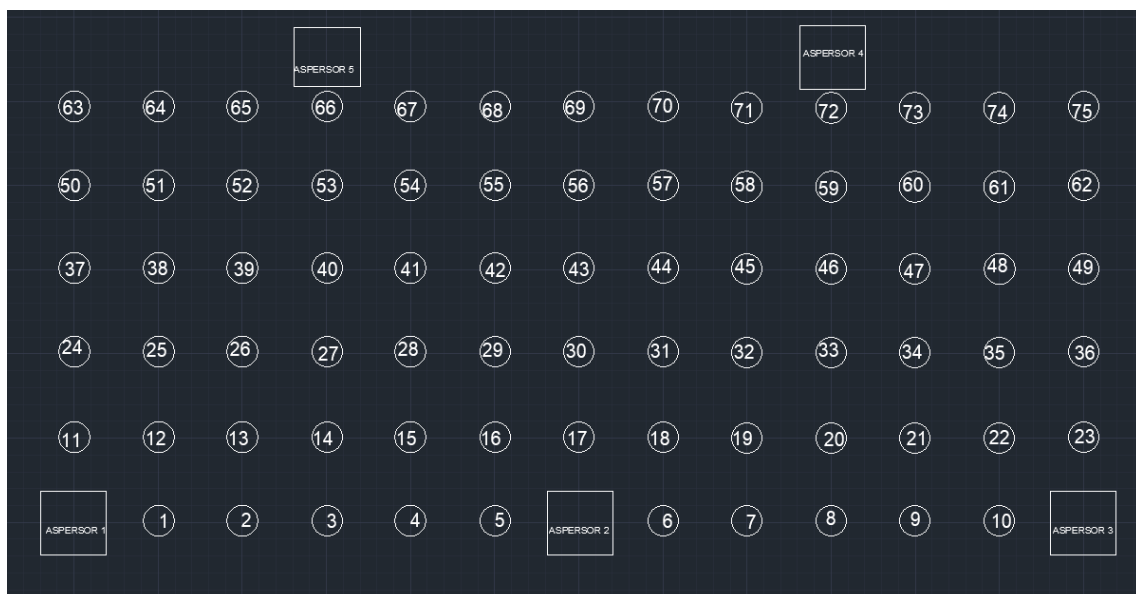


Figura 9. Perspectiva de la disposición de los vasos. Fuente: Elaboración propia con AutoCad.

Una vez establecida la zona designada para el trabajo, procederemos a ubicar los recipientes uno a uno, manteniendo una distancia aproximada de 3 metros entre cada uno, según se observa en la figura 10. La medición precisa de esta separación se llevará a cabo utilizando una cinta métrica, garantizando así una precisión adecuada. En el primer ensayo realizado el 19 de Abril de 2023, se realizó con la presencia y orientación del director de este trabajo, dado que su supervisión resultaba fundamental al tratarse del primer ensayo. Posteriormente, en el segundo ensayo que se realizó el 24 de Abril de 2023 participaron también dos personas, lo cual nos permitió llevar a cabo el ensayo con la colaboración de dos personas, tal como se ilustra en la figura 11. Asimismo, es importante destacar que se dejarán tres espacios sin recipientes, correspondientes a la ubicación exacta de los aspersores. Por último, el tercer ensayo que se hizo el 26 de Abril de 2023 se realizó sin ningún problema destacable.



Figura 10. Organización de los recipientes. Fuente: Elaboración propia.



Figura 11. Colocación de los vasos. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que los recipientes han sido colocados y se ha dispuesto el material requerido (del cual proporcionaremos una explicación detallada más adelante), se procederá a iniciar el riego. Durante cada uno de los ensayos, se variará la presión del agua con el propósito de calcular los parámetros correspondientes a diferentes niveles de presión. Estos valores se mostrarán en la figura 12, brindando así una representación visual de los resultados obtenidos.



Figura 12. Presión indicada en el volante. Fuente: Elaboración propia.

Una vez activado el sistema de riego, se procede a medir la presión en el aspersor utilizando un manómetro. Para lograrlo con precisión, se introduce el manómetro en una boquilla específica mientras se sella la otra boquilla con un tapón. De esta manera, se obtiene con exactitud la lectura de la presión ejercida en el aspersor.

Una vez obtenida la lectura de la presión en el aspersor, procedemos al cálculo del caudal. Para ello, utilizamos una manguera que se inserta en cada una de las dos boquillas, de modo que el agua que fluye es recogida en una garrafa de 2 litros. Una vez que la garrafa se llena, se registra el tiempo necesario para ello. A partir de esta información y mediante tres mediciones distintas, es posible determinar el caudal. Es importante destacar que las pérdidas de agua al introducir la manguera en las boquillas son insignificantes, por lo que los resultados obtenidos son válidos y representativos.

Adicionalmente, se recopilará información sobre la dirección del viento en la parcela durante los diferentes días en los que se llevan a cabo los ensayos. La dirección del viento es un factor de gran relevancia, ya que puede influir significativamente en los valores obtenidos en los recipientes recolectados. En los días en los que se realizaron los ensayos, se observó una presencia mínima de viento, lo que significa que no se producían alteraciones significativas en los resultados obtenidos posteriormente.

7.Resultados:

Se han llevado a cabo tres ensayos en esta parcela. El primer ensayo se realizó a una presión de 3,9 bar, mientras que el segundo se hizo a una presión de 3,5 bar. Para acabar, el tercero se llevo a cabo a una presión de 3 bar.

7.1 Primer ensayo: Pluviometría

En el primer ensayo, se puede apreciar la distribución de la pluviometría en la figura 13 con detenimiento. En la primera sección, se identifica la zona que ha recibido la mayor cantidad de precipitación, alcanzando valores cercanos a los 8-10 mm. A lo largo de los siguientes 6 metros, se observa un descenso gradual en los valores, situándose en torno a los 6-8 mm. En este punto, se comienza a ingresar a la zona central, aunque aún no se ha llegado completamente a ella. Justo antes de adentrarse en dicha área, en la parte inferior, se produce un descenso pronunciado que llega a alcanzar entre 0 y 2 mm, seguido de un incremento instantáneo en el siguiente recipiente, que alcanza entre 2 y 4 mm. Mientras tanto, en la misma zona pero en la parte superior, se registra un notable aumento en la cantidad de agua recibida, llegando a alcanzar valores de 6-8 mm. Resulta interesante observar esta disparidad de datos, ya que se trata de una misma sección de la zona regada. Sin embargo, el análisis y la interpretación de estos resultados se realizarán más adelante.

Una vez que se adentra en la zona central, se puede observar que en la parte superior se produce un descenso considerable, pasando de unos 6-8 mm a unos 2-4 mm. Este descenso no se produce de manera abrupta, sino que se va reduciendo gradualmente, y en los recipientes cercanos a la zona de 6-8 mm, los valores oscilan entre 4-6 mm. Por otro lado, en la parte inferior, se observa un descenso constante hasta alcanzar entre 0 y 2 mm a lo largo de toda la zona central.

Después de analizar detenidamente la zona central, se pasa a la parte final, donde la sección inferior experimenta otro descenso hasta llegar al valor 0 (posiblemente debido a la presencia de un aspersor sectorial, que difiere de los demás aspersores circulares), pero luego se mantiene estable en ese valor entre 0 y 2. En contraste, en la parte superior, justo después de finalizar la zona central, se registra un aumento considerable hasta 6 mm, que se mantiene constante a lo largo de 3 metros y luego disminuye hasta 4 mm.

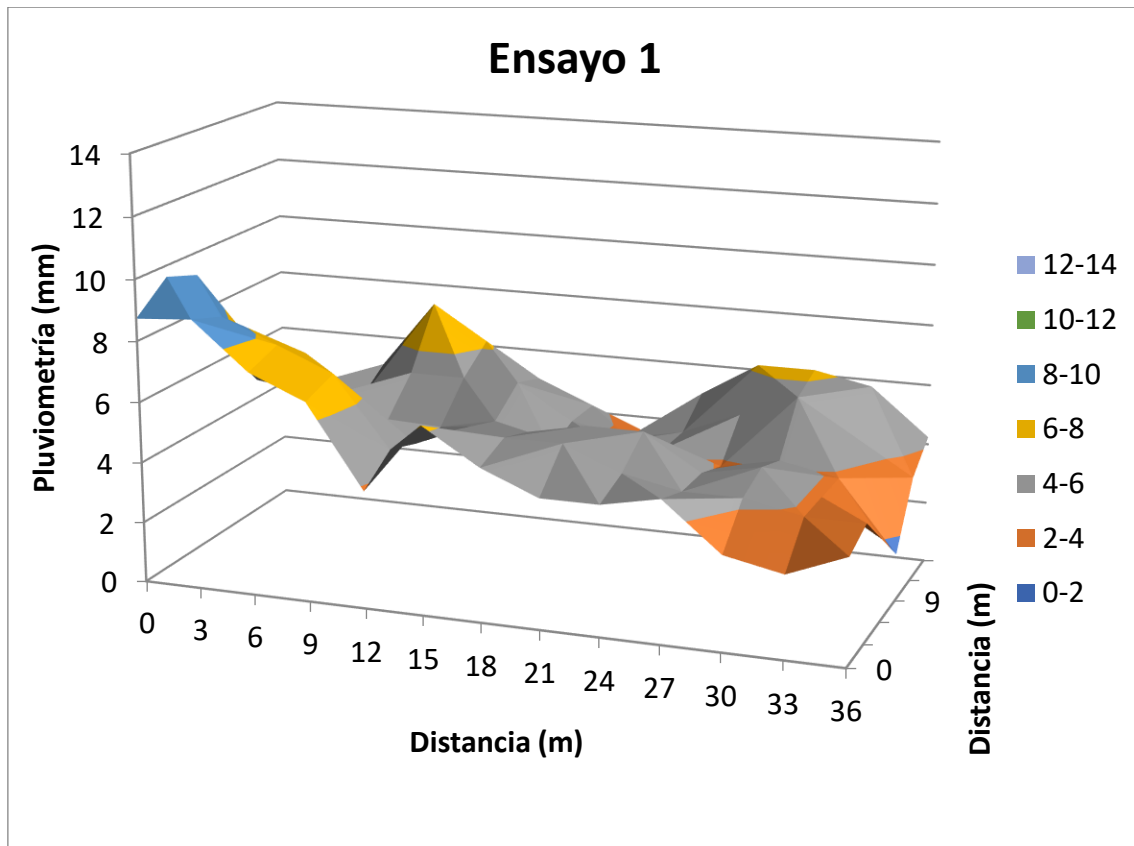


Figura 13. Gráfico de área de la pluviometría del primer ensayo. Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

En la figura 14 se contempla que la porción inferior izquierda ha experimentado una mayor precipitación, con valores oscilantes entre 8-10 y 6-8 mm. Cabe destacar que el área que registra valores de 8-10 mm es reducida y se encuentra cercana al aspersor, lo cual es comprensible debido a que la proximidad incrementa las posibilidades de recibir una mayor cantidad de agua. No obstante, la zona predominante es aquella que ha recibido 6-8 mm, una cantidad considerable en los pluviómetros, aunque inferior a la mencionada anteriormente. Además, dicha área se sitúa en las inmediaciones de la de mayor aporte hídrico.

En la parte superior de la zona izquierda, los valores de pluviometría disminuyen significativamente y llegan casi a mínimos en el área limítrofe con la línea de los aspersores. Una posible razón de ello podría radicar en la mayor distancia existente entre el aspersor y dicha sección. No obstante, en el área más cercana al aspersor, se mantienen valores óptimos en el rango de 6-8 mm, lo cual, como se mencionó previamente, es un fenómeno esperado y bastante probable.

En la sección central de la zona, se observa una tendencia a mantener valores constantes, salvo por pequeñas áreas en las que se presentan ligeras variaciones casi imperceptibles. En la parte inferior de la zona central, la pluviometría se mantiene constante en el rango de 4-6 mm, sin que se produzcan variaciones en esta área. Sin embargo, en la parte central de la zona, se percibe una variación descendente en la pluviometría, aproximándose a los 2-4 mm. No obstante, dicho espacio corresponde a una zona minúscula y, como se mencionó anteriormente, puede considerarse inapreciable.

Otras variaciones se manifiestan en la zona superior, cerca de los límites marcados por la línea de los aspersores. Aquí, la variación en cuanto a la cantidad de agua es similar a la de la zona central, pero el área donde ocurre dicho fenómeno es más amplia que en el caso anterior. Un dato relevante a considerar es que el área más extensa donde se produce esta variación se sitúa justo en el punto medio entre los dos aspersores, lo cual puede ser un factor de gran importancia al momento de realizar los resultados y las discusiones, aspectos que abordaremos más adelante.

Sin embargo, en la zona derecha se evidencia una notable disminución en la pluviometría. Una de las razones principales puede radicar en la presencia de un aspersor sectorial en dicha área, mientras que los demás son de tipo circular. Asimismo, factores como la altura del cultivo o la influencia del viento podrían influir en este fenómeno. En esta sección, la pluviometría oscila entre 2-4 mm, valores muy reducidos, e incluso hay una zona límite que puede descender hasta los 0-2 mm. Estos valores resultan sumamente bajos, y más adelante, en la sección de resultados y discusiones, podremos analizar y explicar.

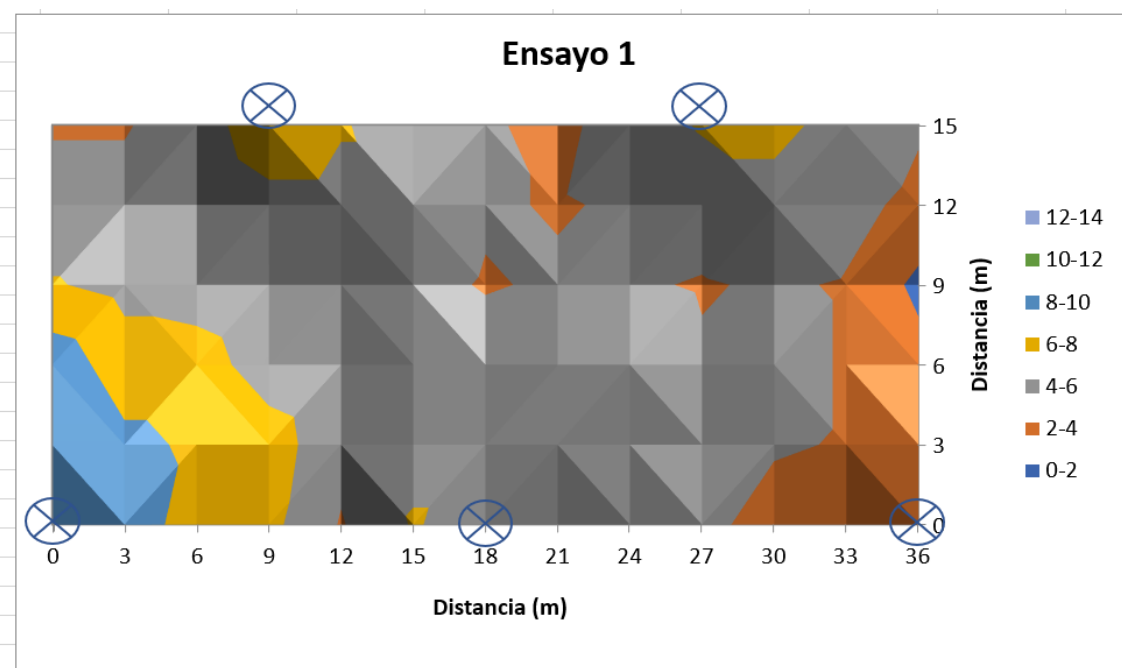


Figura 14. Gráfico de vista aérea de la pluviometría del primer ensayo. Fuente: Elaboración propia por la Excel.

7.2 Segundo ensayo: Pluviometría

Una vez concluido el análisis del ensayo 1, se procede a examinar detenidamente el ensayo número 2. En la figura 15, se observa una similitud notable en los resultados de ambas partes iniciales de los ensayos, con valores más o menos equivalentes. A lo largo de esta zona, se aprecian ciertas diferencias, pero en general se mantiene una tendencia similar, que se extiende hasta la parte central. Sin embargo, es en la última sección donde se evidencian las mayores disparidades entre ambos ensayos. Como se puede constatar en el gráfico, la parte derecha difiere considerablemente entre los dos ensayos, lo cual puede atribuirse a diversas razones, como la presencia de un aspersor sectorial o la influencia del viento durante ese día en particular.

Una vez realizada la comparación entre los dos ensayos, se centra la atención en el ensayo número 2. Al analizar el gráfico, se advierte que en la zona izquierda de la región, se registran valores iniciales bastante elevados, oscilando entre 8-10 mm o 6-10 mm, lo cual se debe a la cercanía de dicha área al aspersor. No obstante, posteriormente se produce un descenso considerable, alcanzando valores de 4-6 mm tanto en la parte superior como en la inferior.

Al adentrarse en la zona central del área de riego, se aprecia una leve elevación en la parte superior, donde los valores vuelven a situarse en el rango de 6-8 mm, similar a los valores iniciales. Por otro lado, en la misma zona pero en la parte inferior, la pluviometría continúa descendiendo hasta alcanzar valores de 2-4 mm. Una vez alcanzado este punto mínimo, se produce una recuperación notable, elevándose de 0-2 mm a 2-4 mm en la parte inferior. Por consiguiente, en la sección final de la zona central, se alcanzan valores equivalentes tanto en la parte superior como en la inferior.

Sin embargo, al adentrarse en la última parte del área de riego, se observan cambios drásticos en los valores. En la parte superior de esta zona, se experimenta un incremento significativo, desde 4-6 mm hasta 10-12 mm, lo cual representa un aumento considerable, casi duplicando la cantidad de agua suministrada. Tras esta notable subida, se mantiene constante durante un tramo de 3 metros, pero después de dicho tramo se produce un leve repunte hasta alcanzar el máximo de 12-14 mm en ese momento. A continuación, los valores disminuyen hasta situarse en el rango de 8-10 mm. En contraste, en la parte inferior no se aprecian cambios tan bruscos como los observados hasta ahora, y es en esta zona donde se mantienen, en teoría, valores constantes alrededor de 2-4 mm, a pesar de experimentar algunas fluctuaciones.

Estos cambios drásticos en la última sección y los valores elevados alcanzados resultan sorprendentes, dado que se mantuvieron constantes durante todo el tramo anterior, y es justo en esta parte donde se producen cambios radicales. Sin embargo, posteriormente se buscará una solución para explicar este fenómeno.

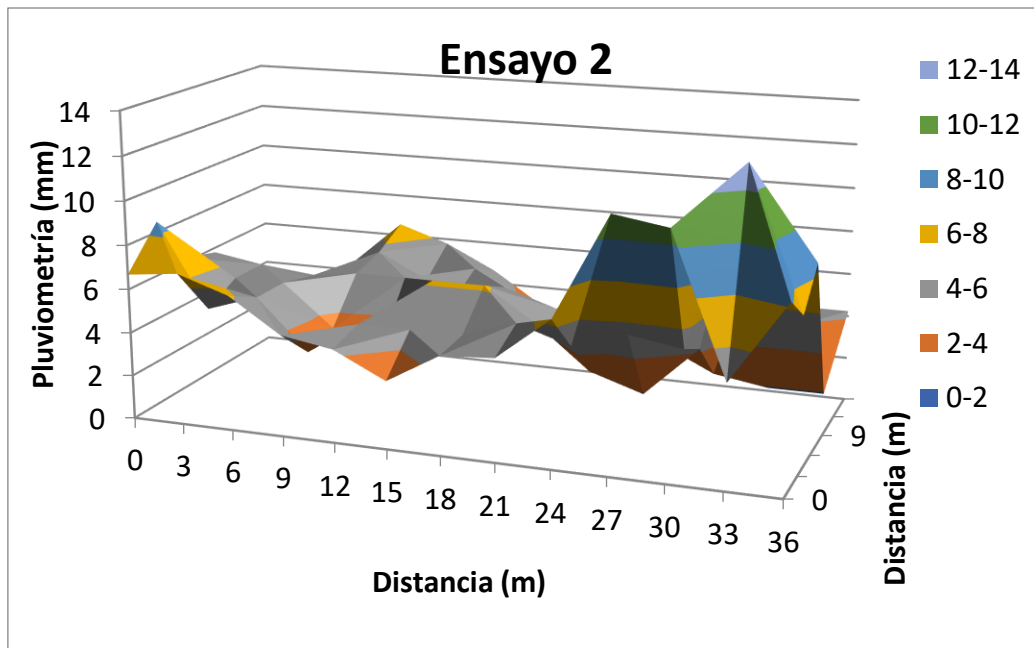


Figura 15. Gráfico de área de la pluviometría del segundo ensayo. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 16, se puede apreciar la notable variedad de cambios presentes en este ensayo con una presión en el volante de 3,5 bar. En ninguna zona se mantienen estables los valores, y se observan modificaciones en todo el área de riego.

En la parte izquierda del gráfico, se puede notar que los valores en la zona inferior son considerablemente altos, posiblemente debido a la proximidad del aspersor a esa área. Estos valores resultan significativamente más elevados en comparación con la zona superior, donde se sitúan en los rangos de 4-6 y 6-8 mm, bastante inferiores a los 8-10 mm registrados en la parte inferior.

En la zona central, se presentan cambios menores en comparación con la primera sección del área de riego. En esta área, los valores se mantienen en el rango de 4-6 mm, aunque existen algunas áreas extensas donde los datos disminuyen a 2-4 mm. Resulta llamativo que estas áreas de menor pluviometría sean amplias y se encuentren cerca de los aspersores, lo cual resulta inusual, ya que se esperaría que los valores fueran más altos en esas zonas. Además, se observa un ligero aumento en una pequeña sección del centro, aunque su extensión es considerablemente menor en comparación con las áreas mencionadas anteriormente.

Finalmente, se analiza la parte derecha del gráfico, que resulta especialmente relevante para las conclusiones, debido a la gran cantidad de cambios y alteraciones que se presentan en esta área. El inicio de esta sección se caracteriza por una disminución a 2-4 mm en la zona central y también en la parte superior. Esta zona abarca una extensión considerable y ocupa la mayor parte del área de riego. Por otro lado, al examinar la parte inferior (donde se ubica el aspersor sectorial), se observan numerosos cambios y alteraciones en

los valores. En primer lugar, en la zona más cercana a este aspersor, los valores son excesivamente altos, llegando a alrededor de 10-12 mm e incluso hay una pequeña área donde alcanzan los 12-14 mm. A medida que nos alejamos ligeramente de este aspersor, los valores se mantienen en el rango de 8-10 mm e incluso pueden disminuir un poco hasta llegar a 6-8 mm. Esta zona es la que registra los valores máximos entre los tres ensayos realizados, sin encontrarse en ninguna otra área valores de 12-14 mm e incluso 10-12 mm. Resulta interesante observar estas variaciones, ya que en la parte superior de esta misma zona, los valores son normales e incluso bajos, pero en esta área específica aumentan más del doble. Como se ha mencionado anteriormente, una razón relevante podría ser la presencia del aspersor sectorial que se encuentra en esa esquina y que podría distorsionar en cierta medida los datos obtenidos.

Al comparar el ensayo 2 con el ensayo 1, se puede apreciar un mayor número de cambios en el segundo ensayo. En el ensayo inicial, los valores se mantuvieron constantes, a excepción de un ligero aumento en la zona inferior izquierda debido a la presencia del aspersor. Sin embargo, en el segundo ensayo realizado, se observa una mayor variabilidad en todas las áreas, especialmente en la parte inferior derecha. Por consiguiente, se puede afirmar que el parámetro de presión desempeña un papel sumamente importante en el riego, y constituye un factor que debe tenerse en cuenta. El estudio de este parámetro conlleva numerosos beneficios, como la posibilidad de reducir costes sin alterar la dosis de riego.

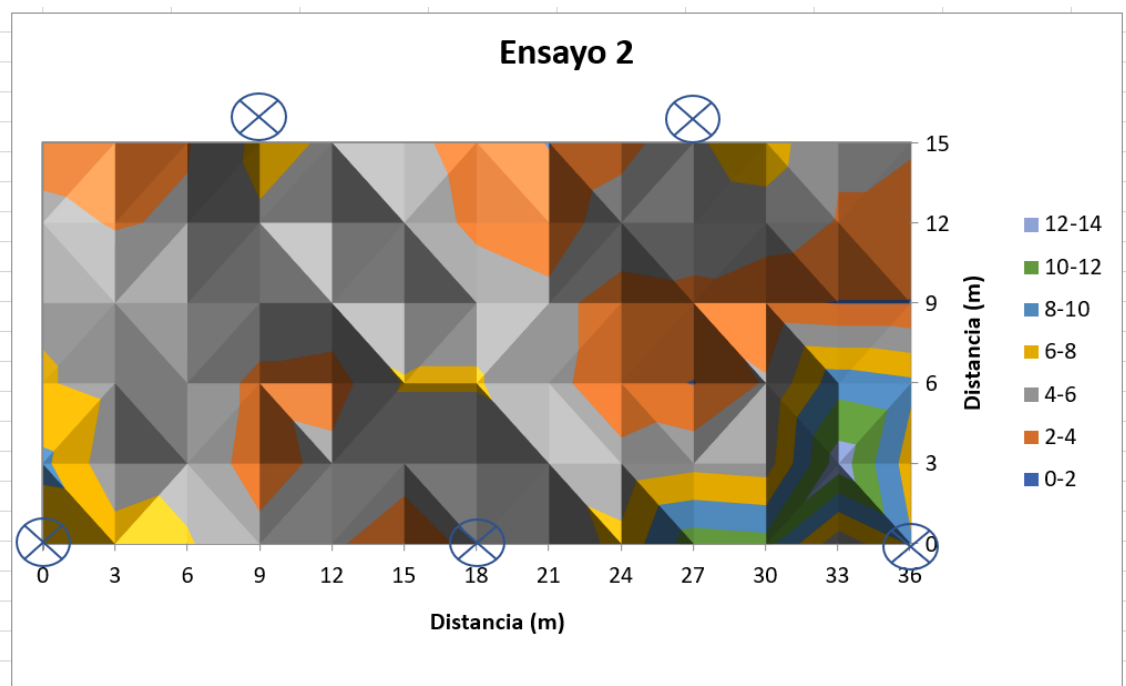


Figura 16. Gráfico de vista aérea de la pluviometría del segundo ensayo. Fuente: Elaboración propia mediante el Excel.

7.3 Tercer ensayo: Pluviometría

Por último, se procede al análisis del ensayo número 3, cuyos resultados se pueden observar en la figura 17. En este ensayo, se aprecian diversos cambios en la pluviometría, aunque en ningún caso se logran alcanzar los valores obtenidos en el ensayo 2.

En la primera zona de estudio, se constata una escasa cantidad de agua caída, apenas llegando a los 2 mm. Estos valores tan reducidos son el resultado de haber disminuido la presión en 1 bar con respecto al ensayo número 1, por lo que es comprensible que se obtengan valores tan bajos a lo largo del área regada. A medida que nos aproximamos a la zona central, se observa un leve incremento donde los valores se elevan hasta los 4-6 mm, específicamente en la parte superior de dicha zona inicial. Por contraste, en la zona inferior se producen descensos considerables.

Al adentrarnos en la zona central del área regada, al momento de ingresar en ella se produce una notable disminución de los valores, pasando de los 4-6 mm a los 0-2 mm en la parte superior, mientras que en la parte inferior se registra un incremento de los valores que luego se mantiene constante a lo largo de 6 metros. Al analizar la primera porción de la zona central, se observa que para concluir esta área se produce un aumento muy significativo en la parte superior, alcanzando valores entre 6-8 mm. No obstante, en esta parte final de la zona inferior, los valores se mantienen constantes, sin experimentar muchas alteraciones y sosteniéndose en el rango de 2-4 mm.

En la parte final del ensayo, se registra un descenso notable desde el pico mencionado anteriormente, donde los valores alcanzan los 6-8 mm, hasta llegar a los 2-4 mm (en la parte superior). A partir de este punto, se produce nuevamente un aumento hasta los 4-6 mm, para luego descender hasta los 4 mm justo, finalizando en valores similares a los 2 mm. En cambio, en la parte inferior los valores se mantienen más o menos constantes, sin experimentar grandes variaciones, ya que se encuentran en todo momento entre 0-2 mm.

Como se puede observar en este ensayo, los valores obtenidos son muy bajos debido a la significativa disminución de la presión, lo que resulta en una cantidad de agua emitida por el aspersor considerablemente inferior a la habitual. Por lo tanto, la cantidad de agua suministrada al cultivo será mínima en todas las zonas, a excepción de aquella que alcanza valores de 8-10 mm. Cabe destacar que esta zona se encuentra muy próxima a dos aspersores, lo que aumenta la probabilidad de que reciba una mayor cantidad de agua en comparación con las demás áreas. Sin embargo, los valores máximos obtenidos en este ensayo no superan los 10 mm.

En cuanto al resto de las zonas, los valores son muy bajos, como se mencionó previamente, y no presentan variaciones significativas. Debido a la presión tan reducida utilizada en este riego de 3 bares en el volante, resulta poco conveniente en términos prácticos, ya que se riega mediante un motor que sufre mucho.

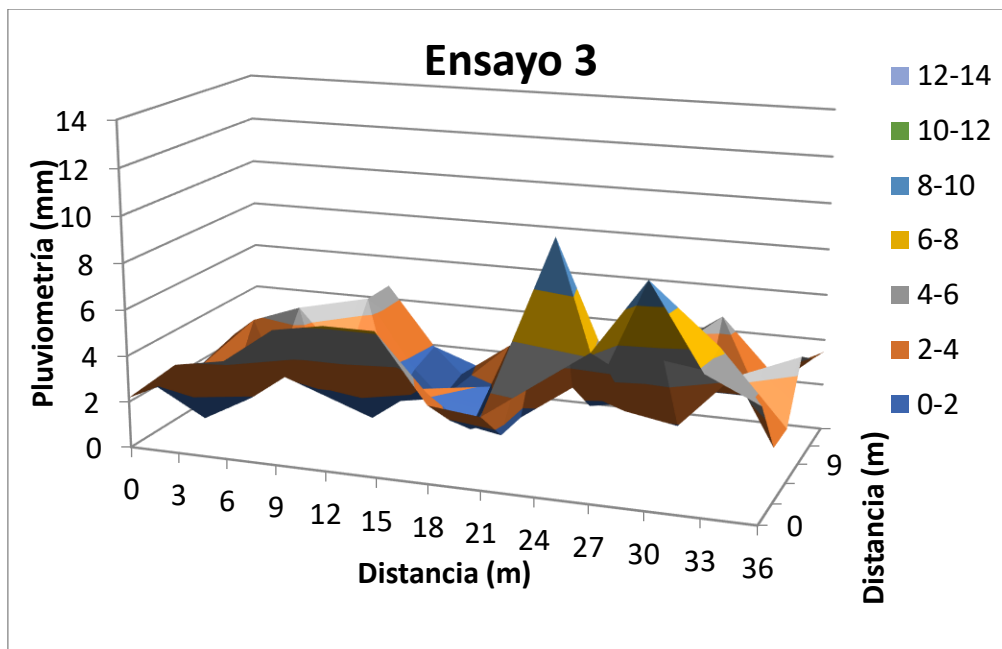


Figura 17 .Gráfico de área de la pluvimetría en el tercer ensayo .Fuente: Elaboración propia con el Excel.

En la figura 18 se aprecia de manera más detallada la distribución del agua a lo largo de todo este ensayo.

En la primera parte, correspondiente al sector izquierdo, los valores son muy bajos, alternando entre 0-2 mm y 2-4 mm. En esta área regada no se presentan grandes variaciones, y estos valores se mantienen constantes a lo largo de la zona central. En esta zona, predominan los valores entre 0-2 mm en la parte superior, pero es importante destacar un incremento en la zona inferior, donde se registra una superficie considerable con valores de 4-6 mm. Este incremento coincide con la proximidad de dos aspersores ubicados en esa área, y también se puede observar una pequeña zona amarilla en los límites de los aspersores.

En la parte final de esta área regada se encuentra la zona donde se producen mayores cambios. En la esquina inferior derecha, la cantidad de precipitación es considerablemente alta, lo cual puede deberse a la presencia de un aspersor sectorial en esa misma ubicación. Se puede observar que los valores alcanzados en esa zona son de 6-8 mm y 8-10 mm, lo cual resulta notablemente alto considerando la baja presión utilizada en el riego. Sin embargo, esto solo ocurre en esa zona específica, ya que en la parte superior de la misma los valores son constantes y muy bajos, oscilando entre 2-4 mm. Como se mencionó previamente, una explicación plausible para este aumento de valores en esa zona es la presencia del aspersor circular.

Las conclusiones más relevantes extraídas de este ensayo son que a menor presión, lógicamente se obtendrán valores de precipitación considerablemente más bajos en comparación con los otros ensayos realizados. En este caso, la

reducción de presión ha sido notable, disminuyendo en 1 bar, lo cual afecta directamente al riego realizado, como era de esperar.

En cuanto a los ensayos realizados, lo más conveniente sería utilizar una presión superior a la empleada en el tercer ensayo. No obstante, surge la interrogante sobre cuánto se debe aumentar esa presión, ya que un aumento excesivo puede generar gastos innecesarios. Todas estas cuestiones serán abordadas en los apartados posteriores.

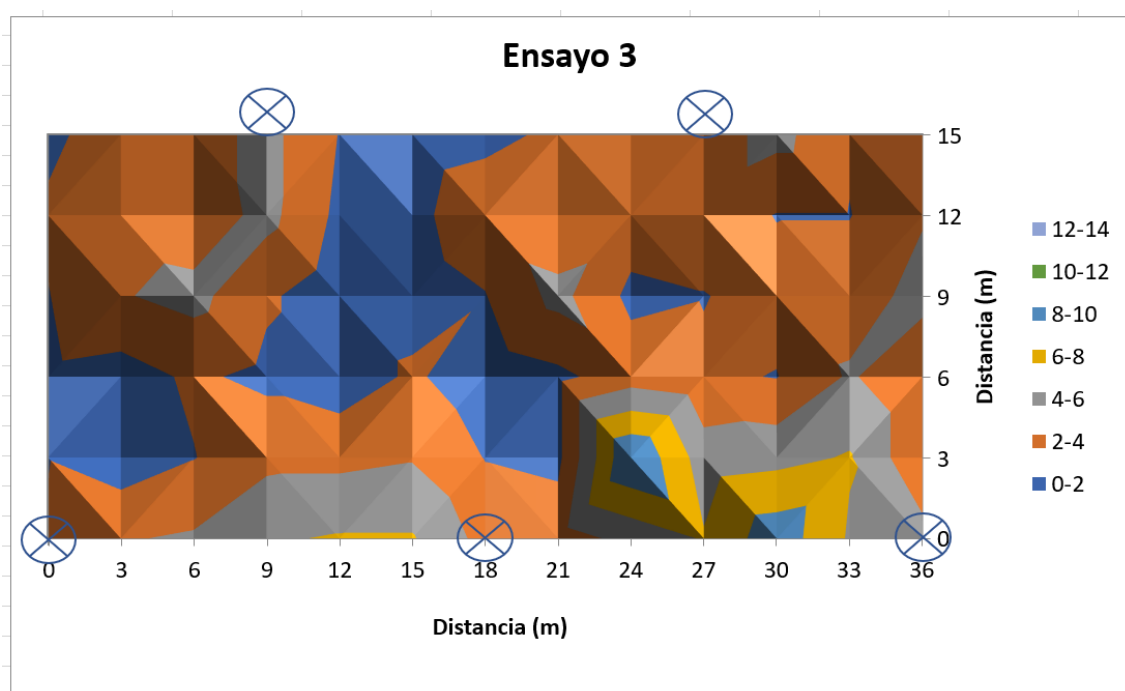


Figura 18. Gráfico de vista aérea de la pluviometría del ensayo 3. Fuente: Elaboración propia con el Excel.

7.4 Primer ensayo(P=3,9 bar)

7.4.1 Tabla de mm de campo:

En la tabla 2 se presentan los valores de milímetros de campo obtenidos, y se observan notables disparidades entre ellos según la zona. Por ejemplo, en la parte izquierda se registran valores significativamente más altos que no se repiten en ninguna otra área. En general, los demás valores suelen oscilar entre 4 mm y 6 mm, aunque hay algunos vasos que alcanzan más de 6 mm, llegando incluso cerca de 7 mm, pero esto se trata de casos aislados. Por otro lado, existen otros valores que se acercan a 4 mm pero no llegan a alcanzarlo completamente.

En resumen, en este estudio los valores recopilados tienden a situarse entre 4 mm y 6 mm, con excepción de la zona izquierda, donde los valores son considerablemente más elevados. Estas diferencias notorias en los valores de

milímetros de campo pueden indicar particularidades en la medición o características específicas en esa región en particular, lo cual puede requerir un análisis más detallado para comprender las causas subyacentes

8,99	8,86	7,32	6,55	3,85	6,16	5,31	4,24	4,24	4,62	3,08	2,70	3,46
9,63	8,48	7,71	6,94	4,62	5,39	5,39	5,39	4,62	4,24	4,24	3,85	3,85
9,25	6,94	6,94	5,01	4,24	5,01	5,01	5,39	5,39	4,24	4,62	3,85	2,70
6,16	5,39	5,01	4,24	4,24	4,62	3,85	4,24	4,24	3,85	4,24	3,85	1,54
4,62	4,62	4,24	5,39	5,39	5,39	4,24	3,85	4,24	5,01	5,78	4,62	3,47
3,85	3,85	5,01	7,32	6,16	5,01	4,24	3,47	5,01	6,16	6,16	5,78	4,24

*Tabla 2. Los datos de mm de campo que han caído sobre los vasos en el ensayo numero 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de los Excel calculados.*

7.4.2 Tabla de desviaciones:

En la tabla 3 adjunta se presentan los valores de desviación, que representan las diferencias entre el valor registrado y el valor medio. En este estudio, se pueden observar desviaciones significativas en la zona izquierda, donde se encontraban los valores más altos de milímetros de campo. Es comprensible que se produzcan desviaciones más amplias en esta área, ya que los valores de milímetros de campo son notablemente elevados, lo que genera una mayor disparidad con respecto a los valores medios.

Por otro lado, las desviaciones en las otras zonas parecen estar dentro de los rangos normales. Los valores máximos se acercan a los 2 mm pero no lo superan, mientras que el resto de las desviaciones se sitúan entre 0 mm y 1,5 mm, manteniéndose en límites adecuados en las demás áreas. Estos valores se consideran bastante concordantes con las expectativas y no revelan desviaciones sustanciales en comparación con el valor medio.

En conclusión, en este estudio se observan desviaciones notables en la zona izquierda, mientras que las desviaciones en las demás zonas se mantienen en rangos adecuados, lo cual es congruente con los valores medios establecidos. Estos hallazgos sugieren que las mediciones en general son consistentes y confiables, aunque se deben considerar las particularidades de la zona izquierda en términos de desviaciones más amplias debido a los valores extremadamente altos de milímetros de campo registrados en esa área.

3,96	3,83	2,29	1,52	1,18	1,14	0,60	0,79	0,79	0,41	1,95	2,33	1,56
4,60	3,45	2,68	1,91	0,41	0,36	0,36	0,36	0,41	0,79	0,79	1,18	1,18
4,22	1,91	1,91	0,02	0,79	0,02	0,02	0,36	0,36	0,79	0,41	1,18	2,33
1,14	0,36	0,02	0,79	0,79	0,41	1,18	0,79	0,79	1,18	0,79	1,18	3,49
0,41	0,41	0,79	0,36	0,36	0,36	0,79	1,18	0,79	0,02	0,75	0,41	1,56
1,18	1,18	0,02	2,29	1,14	0,02	0,79	1,56	0,02	1,14	1,14	0,75	0,79

Tabla 3. Valores de las desviaciones que se producen en el ensayo 1. Fuente: Elaboración propia a partir de los Excel calculados.

7.5 Segundo ensayo (P=3,5 bar)

7.5.1 Tabla de mm de campo:

En la tabla 4 se observan algunas diferencias con respecto al primer ensayo, ya que se aprecian valores más variables en lugar de la regularidad presente anteriormente. En este nuevo conjunto de datos, se pueden identificar valores muy elevados en la parte derecha de la gráfica, superando incluso el umbral de 10 mm. Además, en la zona izquierda se encuentran ciertos valores que superan el valor de 8 mm.

En cuanto a la zona central, se presentan números bastante variables, con algunos vasos que registran alrededor de 6 mm y otros que se aproximan a los 3 mm, casi la mitad de la medida más alta. A excepción de lo mencionado anteriormente y algunos valores cercanos a 2 mm, los valores medios en este ensayo se sitúan entre 3 mm y 4,5 mm, lo cual se considera dentro de un rango normal.

Estos resultados indican una mayor variabilidad en comparación con el primer ensayo, evidenciando diferencias notables en las mediciones. Los valores más altos en la parte derecha y la presencia de desviaciones significativas en la zona izquierda podrían señalar anomalías o particularidades en esas áreas específicas.

6,68	6,94	6,16	4,62	4,24	3,08	4,46	4,62	6,55	11,17	10,79	4,62	8,22
8,48	4,62	5,39	3,08	4,62	4,62	4,62	5,39	4,62	5,39	5,01	13,1	6,94
6,16	5,39	5,39	3,47	3,08	6,16	6,16	4,62	2,70	1,93	4,24	9,25	8,48
5,78	5,39	5,01	5,39	5,39	4,62	5,39	4,62	3,08	3,47	2,31	1,93	1,93
4,62	3,85	4,24	5,78	4,62	5,39	3,47	2,70	5,39	5,01	5,24	3,85	3,08
3,08	2,70	3,85	6,55	5,78	4,62	3,08	1,93	3,08	5,78	6,94	4,24	4,24

Tabla 4. En el ensayo número 2, se han registrado los valores de milímetros de campo que han caído sobre los vasos. Fuente: Elaboración propia en base a Excel calculadas.

7.5.2 Tabla de desviaciones

En relación a las desviaciones presentadas en la tabla 5, se observan notables disparidades en los vasos que se han reportado con valores superiores a 10 mm y 8 mm. Sin embargo, los demás valores se encuentran dentro de un rango considerado normal, con diferencias que oscilan entre 0,5 mm y 1,5 mm.

Estas grandes desviaciones destacadas en los vasos que exceden los umbrales de 10 mm y 8 mm indican la presencia de valores atípicos en esos casos específicos. Estas desviaciones significativas sugieren la existencia de condiciones singulares en los vasos identificados, que podrían requerir una atención adicional para su evaluación y análisis detallado.

Por otro lado, los valores que se mantienen en el rango de medidas normales, con diferencias entre 0,5 mm y 1,5 mm, indican una mayor consistencia y homogeneidad en esos casos, lo cual es coherente con un patrón más típico y predecible en la muestra.

1,93	1,96	1,19	0,35	0,74	1,89	0,67	0,35	1,57	6,20	5,81	0,35	3,47
3,50	0,35	0,42	1,89	0,35	0,35	0,35	0,42	0,35	0,42	0,03	8,12	1,96
1,19	0,42	0,42	1,51	1,89	1,19	1,19	0,35	2,28	3,05	0,74	4,27	3,50
0,80	0,42	0,03	0,42	0,42	0,35	0,42	0,35	1,89	1,51	2,66	3,05	3,05
0,35	1,12	0,74	0,80	0,35	0,42	1,51	2,28	0,42	0,03	0,26	1,12	1,89
1,89	2,28	1,12	1,57	0,80	0,35	1,89	3,05	1,89	0,80	1,96	0,74	0,74

Tabla 5. En el ensayo número 1, se han registrado los valores de las desviaciones que se han producido. Fuente: Elaboración propia a partir de los Excel calculados

7.6 Tercer ensayo (P=3 bar)

7.6.1 Tabla de mm de campo:

En la tabla 6, se destaca la presencia de valores considerablemente bajos, excepto por un vaso que alcanzó los 10 mm (lo cual plantea la posibilidad de una medición incorrecta). En general, los demás valores se mantienen dentro de un rango bastante normal, salvo en la zona derecha, donde se observan valores alrededor de 5 y 6 mm. Por otro lado, los valores en la parte central y en la izquierda son ligeramente más bajos, oscilando entre 2 y 4 mm.

Estos resultados indican una tendencia hacia mediciones más reducidas en la tabla 6. Sin embargo, es importante considerar la posible influencia de errores de medición, especialmente en el caso del vaso que alcanzó los 10 mm, ya que esta cifra es inusualmente alta en comparación con los demás registros.

2,18	3,85	4,24	5,78	6,16	6,16	3,31	3,08	4,62	6,16	9,25	5,78	4,75
1,93	0,77	1,93	3,47	3,47	3,85	1,93	1,54	10,02	5,01	5,39	6,16	2,31
1,54	1,16	2,31	1,54	0,77	2,31	0,77	1,54	3,08	2,31	1,93	4,24	2,31
1,93	3,85	4,62	2,31	0,77	1,16	1,93	4,62	1,54	1,93	2,70	3,08	4,62
2,31	3,08	2,70	4,62	1,54	1,54	3,08	2,31	3,08	3,08	1,93	1,93	3,85
1,54	3,08	3,08	4,62	1,93	1,16	1,54	2,31	2,31	3,08	4,62	2,31	3,47

Tabla 6. En el ensayo número 3, se han registrado los valores de milímetros de campo que han caído sobre los vasos. Fuente: Elaboración propia en base a los Excel calculados.

7.6.2 Tabla de desviaciones

En relación a las desviaciones presentadas en la tabla 7, se destaca la presencia de una gran desviación en el vaso de 10 mm, mientras que los demás valores se mantienen dentro de un rango considerado normal. Es importante mencionar que las desviaciones son significativas en la zona derecha, donde se encontraban los valores más altos, mientras que en las zonas central e izquierda, las desviaciones son más pequeñas.

Estos resultados sugieren que, aparte del vaso de 10 mm con una desviación notable, los demás registros presentan desviaciones que se consideran dentro de un rango aceptable y esperado. La presencia de desviaciones considerables en la zona derecha, donde se registraron los valores más altos, puede indicar particularidades en esa área específica que podrían requerir una evaluación adicional para comprender mejor las causas subyacentes y su posible implicancia clínica.

1,42	0,73	1,12	2,66	3,05	3,05	1,31	0,04	1,51	3,05	6,13	2,66	2,17
1,19	2,35	1,19	0,35	0,35	0,73	1,19	1,58	6,90	1,89	2,28	3,05	0,81
1,58	1,96	0,81	1,58	2,35	0,81	2,35	1,58	0,04	0,81	1,19	1,12	0,81
1,19	0,73	1,51	0,81	2,35	1,96	1,19	1,51	1,58	1,19	0,42	0,04	1,51
0,81	0,04	0,42	1,51	1,58	1,58	0,04	0,81	0,04	0,04	1,19	1,19	0,73
1,58	0,04	0,04	1,51	1,19	1,96	1,58	0,81	0,81	0,04	1,51	0,81	0,35

Tabla 7. Valores de las desviaciones que se producen en el ensayo 3. Fuente: Elaboración propia.

7.7 Primer ensayo: Gráficos de desviaciones

La figura 19 evidencia de manera patente que las desviaciones en la sección izquierda alcanzan sus máximos valores, aproximadamente entre 4 y 6 mm. Sin embargo, es importante resaltar que esta porción de la gráfica es bastante reducida, y una vez superada la marca de los 3 metros, se produce una disminución notable hasta situarse entre 2 y 4 mm.

Tras este descenso, los valores se mantienen constantes a lo largo del resto de las áreas, sin manifestar cambios o perturbaciones, puesto que los valores

correspondientes a estas secciones oscilan entre 0 y 2 mm. Conviene señalar que en el extremo derecho de la gráfica se aprecia un leve incremento hasta llegar a los 2-4 mm, pero debido a la brevedad de esta región, su impacto resulta prácticamente imperceptible.

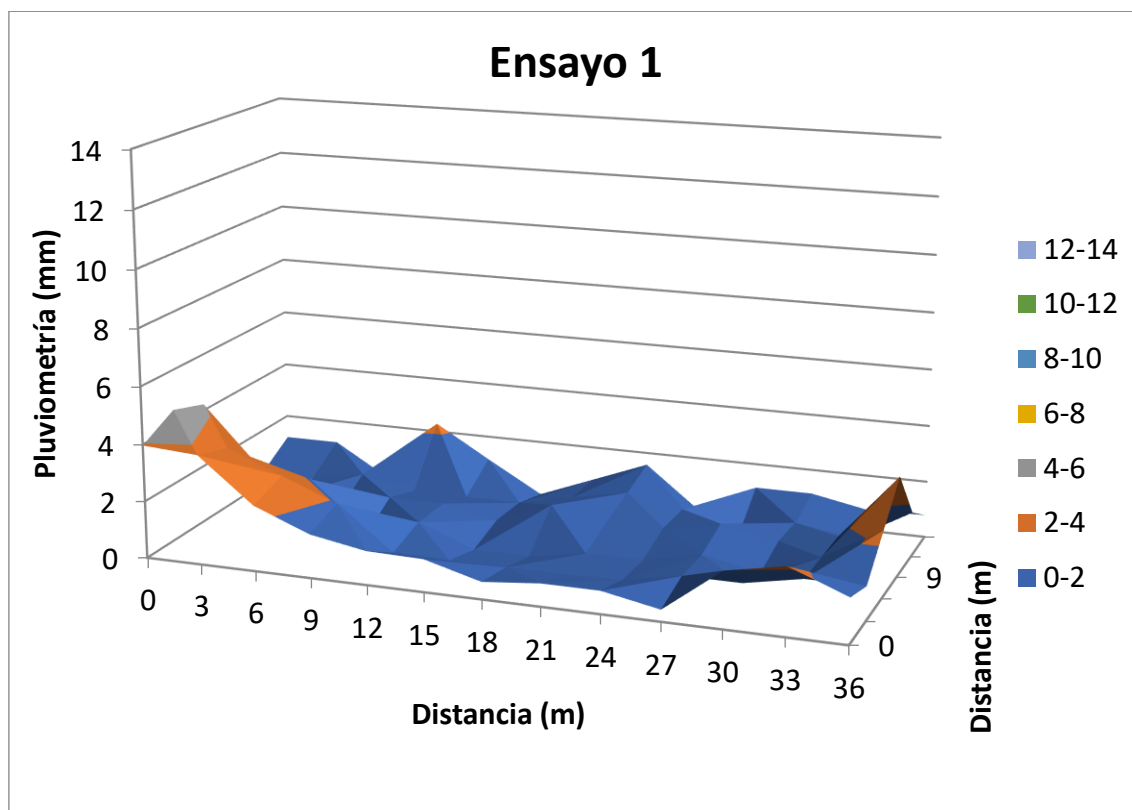


Figura 19. Valores de las desviaciones en el primer ensayo. Fuente: Elaboración propia a través de Excel.

A continuación se observa una representación más nítida y precisa de las afirmaciones previas. Podemos constatar de manera inequívoca que la región izquierda es la que presenta una mayor cantidad de desviaciones, tal como se ha señalado previamente. Asimismo, en la porción derecha también se observa un aumento en las desviaciones, aunque este incremento se circunscribe a una región considerablemente más reducida que la izquierda. No obstante, resulta relevante destacar que en el resto de las áreas contempladas en la figura 20, se constata que los valores se mantienen invariables, oscilando siempre dentro del intervalo comprendido entre 0 y 2.

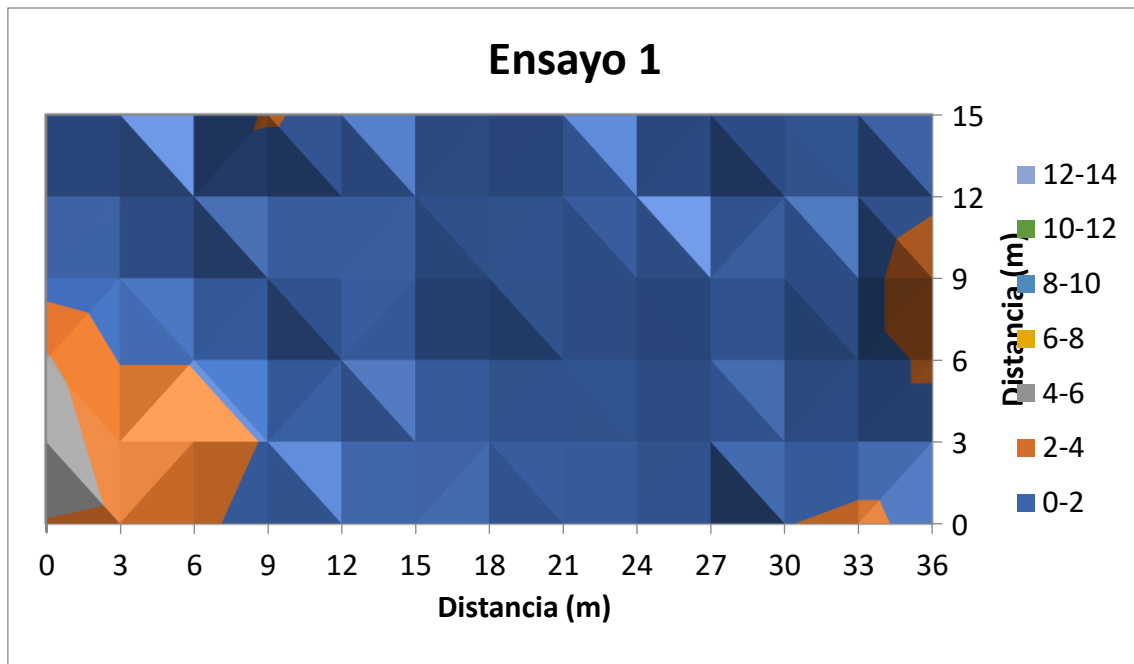


Figura 20. Valores de las desviaciones en el primer ensayo visto de otra manera. Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

7.8 Segundo ensayo: Gráficos de desviaciones

Procederemos ahora al análisis de las desviaciones presentes en el segundo ensayo, cuyas características difieren en cierta medida de las del ensayo inicial, tal como se puede constatar al observar detenidamente la figura 21.

En la sección izquierda de la gráfica, es posible apreciar valores de desviación que oscilan entre 2 y 4 mm. Si bien estos valores muestran cierta elevación, a medida que avanzamos más allá de los 3 metros, se produce una disminución progresiva que los sitúa en el rango de 0 a 2 mm. Es importante destacar que este último valor se mantiene constante a lo largo de un tramo de 21 metros, correspondiente a la parte central del ensayo.

Una vez concluida esta sección central, nos adentramos en la zona derecha de la gráfica, en la cual se observa el mayor número de desviaciones. En su inicio, esta área presenta valores cercanos a 2-4 mm, que luego se elevan hasta alcanzar cifras de 6-8 mm. Existe un momento en el cual se alcanza un pico máximo con este último valor, lo cual implica una desviación de gran magnitud. Cabe resaltar que, en la parte final de esta zona derecha, donde se encuentra dicho pico, la desviación desciende nuevamente hasta situarse en el rango de 2 a 4 mm.

Resulta sumamente interesante destacar la marcada alteración que se produce en dicho pico mencionado anteriormente, y una posible explicación para ello podría residir en la presencia de un aspersor sectorial.

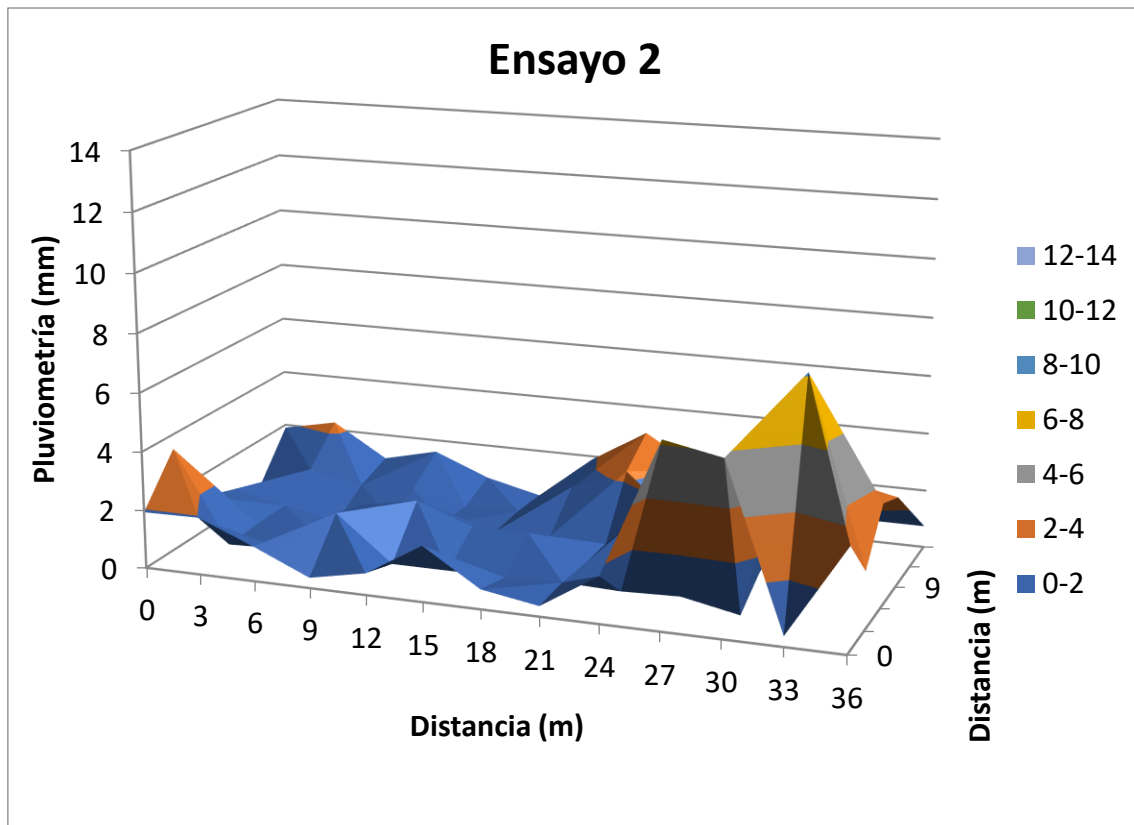


Figura 21. Valores de desviaciones en el segundo ensayo. Fuente: Elaboración propia en el Excel.

La figura 22 nos brinda una representación más detallada y precisa de las desviaciones correspondientes a este ensayo en particular.

En primer lugar, podemos observar claramente el pico mencionado previamente en la parte derecha de la gráfica, donde los valores de desviación se sitúan en el intervalo de 6 a 8 mm. En las proximidades de este pico, podemos apreciar una zona circundante con valores de desviación comprendidos entre 2 y 4 mm.

Además, en la zona izquierda y en la parte superior de la zona central, se identifica otra región donde las desviaciones oscilan entre 2 y 4 mm.

Por otro lado, en el resto de las zonas contempladas en la gráfica, los valores de desviación se mantienen constantes, siempre ubicados en el rango de 0 a 2 mm.

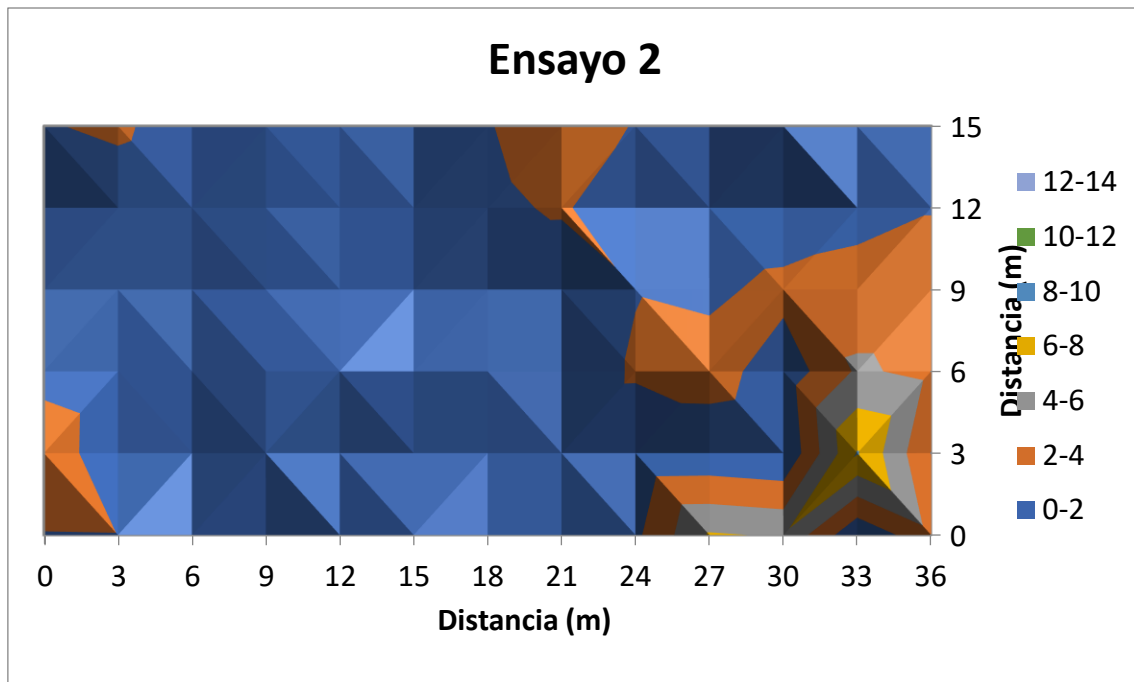


Figura 22. Valores de desviaciones en el segundo ensayo en otra perspectiva. Fuente: Elaboración propia en el Excel.

7.9 Tercer ensayo: Gráficos de desviaciones

Por último, es pertinente mencionar que el ensayo 3 presenta diferencias notables en comparación con los ensayos anteriores, aunque no se alcanza un pico tan sobresaliente como en el ensayo 2.

Al examinar detenidamente la figura 23, es evidente que los valores de desviación suelen ser bastante bajos en general. En la zona izquierda de la gráfica, los valores se sitúan en el rango de 0 a 2 mm, aunque existen áreas muy reducidas donde se alcanzan valores de 2 a 4 mm.

En la parte central del ensayo, se observa un patrón similar, con desviaciones predominantemente bajas. No obstante, al acercarnos al final de esta sección central, se produce un incremento significativo que eleva las desviaciones hasta alcanzar valores de 6 a 8 mm. Es importante destacar que este pico se manifiesta en un espacio muy reducido, siendo esta la principal diferencia en comparación con el ensayo 2, donde dicho pico abarcaba una superficie más extensa.

Cuando nos adentramos en la parte final de la gráfica, se registra otro pico, pero en esta ocasión los valores máximos alcanzan el rango de 4 a 6 mm. Tras este pico, las desviaciones vuelven a descender hasta situarse en el intervalo de 0 a 2 mm, y se mantienen en esta franja a lo largo de la sección final ubicada en el extremo derecho de la gráfica.

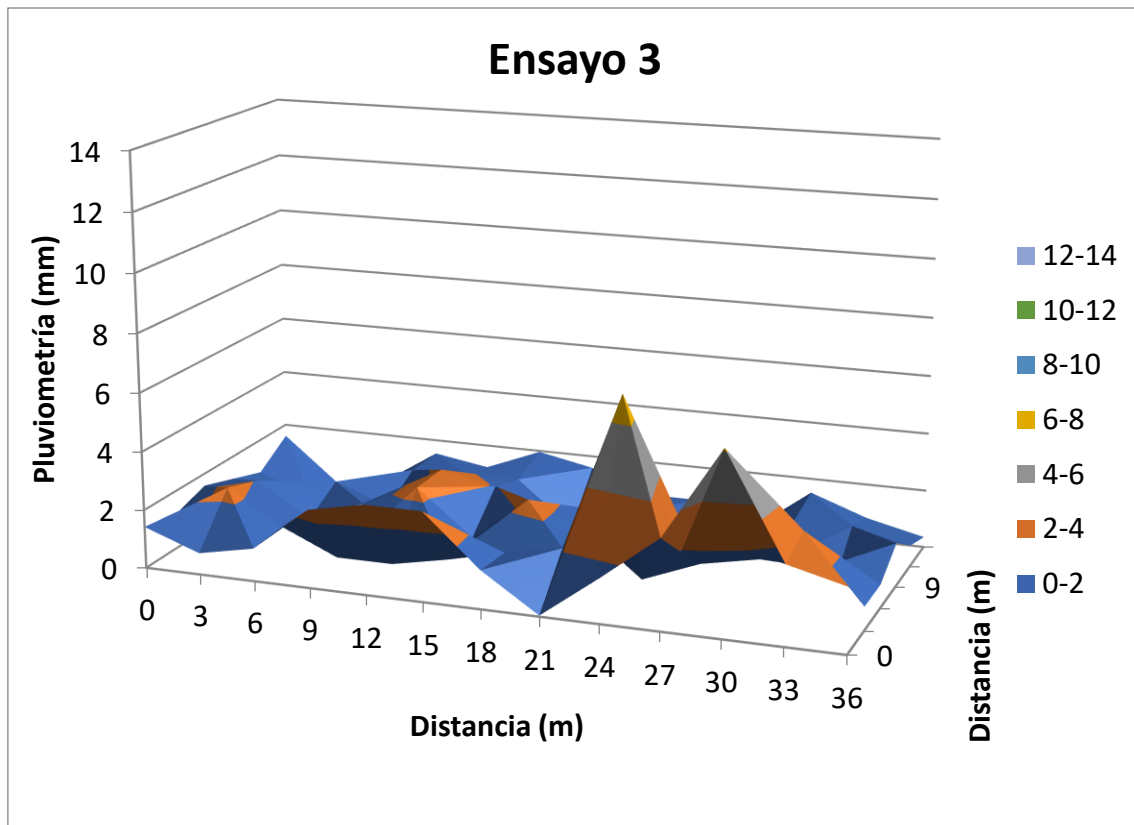


Figura 23. Valores de las desviaciones en el tercer ensayo. Fuente: Elaboración propia por el Excel

En la figura 24 se puede distinguir con mayor claridad y notoriedad lo mencionado con antelación. En la porción derecha de la gráfica, se aprecia la presencia del pico previamente mencionado, así como el otro pico que alcanzaba valores de 4 a 6 mm. Resulta destacable que ambos picos se encuentran rodeados de áreas con valores de desviación comprendidos entre 2 y 4 mm. Además, en la zona central de la gráfica también se identifican algunas áreas de valores de 2 a 4 mm, si bien estas son de dimensiones reducidas.

Por otro lado, en el resto de las zonas contempladas en la gráfica, los valores de desviación se mantienen constantes, situándose siempre en el intervalo de 0 a 2 mm.

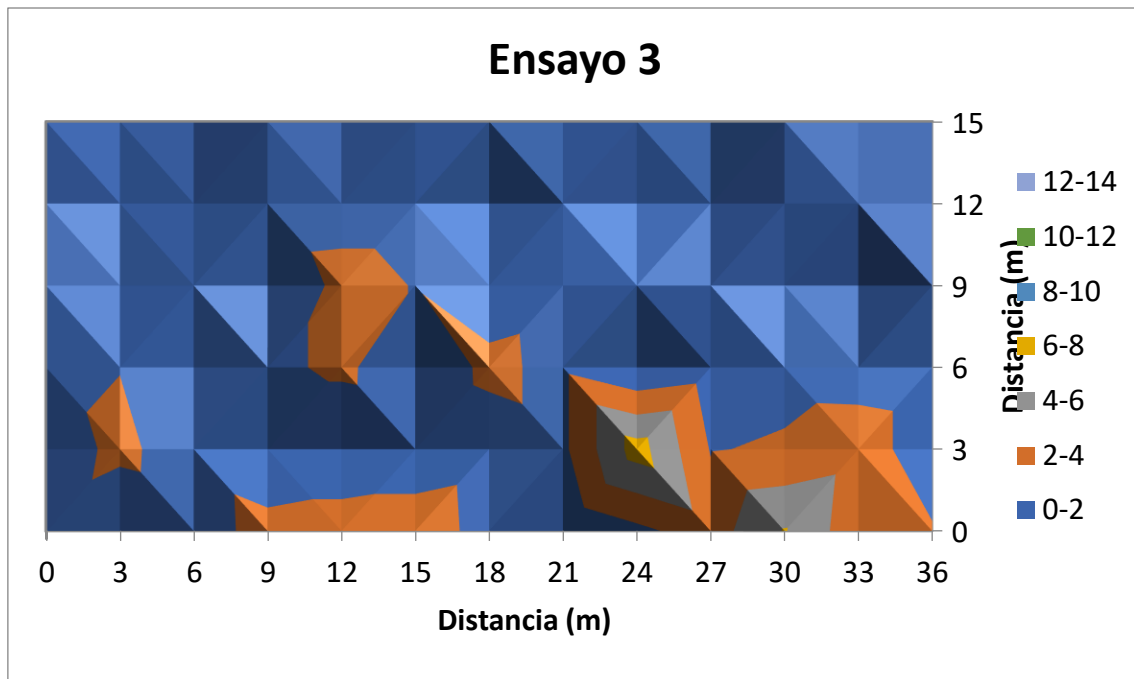


Figura 24. Valor de las desviaciones en el tercer ensayo enfocado de otra manera. Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

Una vez realizados los cálculos pertinentes, se podrán obtener diversas gráficas que reflejen los resultados obtenidos. En primer lugar, se tendrán los gráficos correspondientes a cada ensayo realizado, mostrando las marcadas diferencias existentes entre ellos. Estos gráficos proporcionarán información detallada sobre la cantidad de agua que ha sido distribuida en cada zona, representándola en un gráfico de superficie. Asimismo, se presentará otro gráfico con la misma información, pero organizado de manera que podamos observar los resultados desde una perspectiva aérea simulada.

Posteriormente, se dispondrá de múltiples gráficos que incorporarán todas las variables calculadas, las cuales serán multiplicadas por 10, excepto el Coeficiente de Uniformidad, a fin de lograr una representación más equilibrada. Dichas variables comprenderán la uniformidad de distribución, la eficiencia potencial del riego, el coeficiente de uniformidad y el valor medio aplicado y recogido.

Estos gráficos permitirán una visualización exhaustiva de los resultados obtenidos en el estudio, brindando una representación clara y concisa de los diversos parámetros evaluados.

7.10 Parámetro de la presión:

En relación al parámetro de la presión, este se encuentra determinado por la gráfica que se presenta a continuación. En dicha gráfica se representa la presión en el volante correspondiente a cada uno de los ensayos realizados. Cabe destacar que en el primer ensayo, la presión inicial fue de 3,9 bar, aunque se multiplicó por 10 para obtener una representación más adecuada en el gráfico (este ajuste también se aplicó al resto de los ensayos). En el segundo ensayo, se decidió reducir la presión en 0,5 bar, alcanzando así un valor de 3,5

bar en el volante. Por último, en el tercer ensayo se optó por disminuir aún más la presión, llegando a 3 bar, lo cual representa una presión muy baja y afecta directamente al rendimiento del motor encargado de impulsar el agua.

La figura 25 muestra las presiones registradas en el volante y las presiones en el aspersor son obtenidas mediante la colocación de un tapón en una boquilla específica. En el primer ensayo, se logró una presión en el aspersor de 3,9 bar. En el segundo ensayo, esta presión disminuyó considerablemente, situándose en torno a los 3-3,1 bar. En el tercer ensayo, la presión en el aspersor fue similar a la del segundo ensayo, alrededor de los 3 bar.

Adicionalmente, en la aplicación mencionada previamente, AgronicApp, también se muestra la presión utilizada durante el riego. Esta presión es determinada por la propia aplicación, y por lo general, existen pequeñas diferencias de aproximadamente 0,2 bar entre la lectura en el dispositivo móvil y la indicada en el volante. Por ejemplo, en el segundo ensayo, la presión registrada en el móvil fue de 3,2 bar, mientras que en el primer ensayo se obtuvo una lectura de 3,7 bar. No obstante, en el tercer ensayo no fue posible determinar la lectura de presión en el móvil debido a diversas circunstancias.

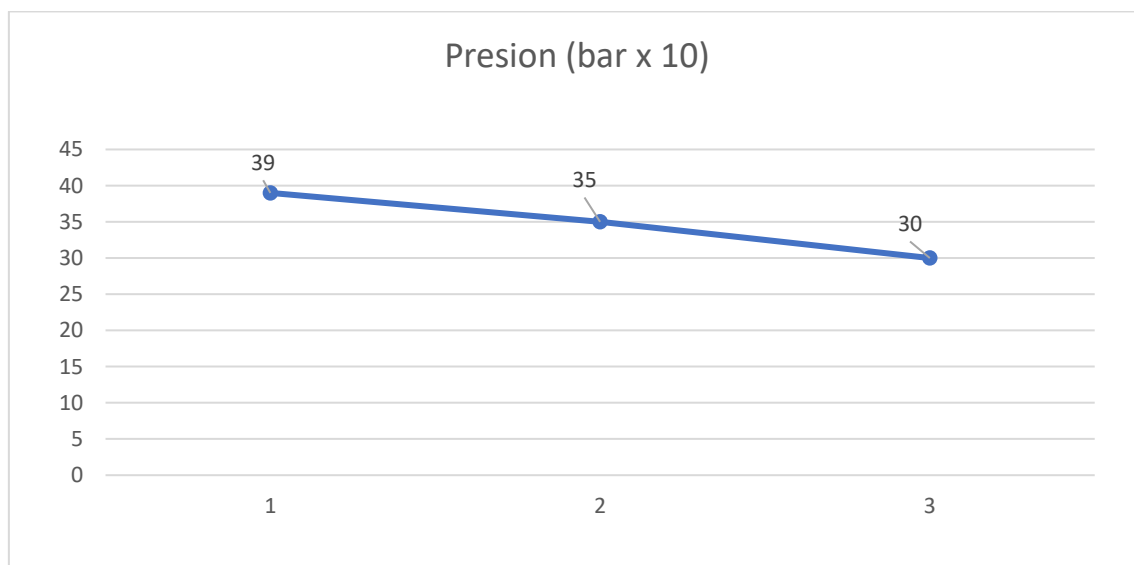


Figura 25. Gráfico de presión en el volante. Fuente: Elaboración propia de datos sacados personalmente.

7.11 Uniformidad de distribución:

El siguiente parámetro que merece análisis es la uniformidad de distribución, la cual se encuentra representada en el gráfico correspondiente. Esta medida de uniformidad se obtiene a partir del cálculo de la media total del volumen recogido en los vasos, así como la media del cuarto inferior, que representa el 25% de los vasos con menor cantidad de agua recolectada. La uniformidad de distribución se determina dividiendo la media del cuarto inferior entre la media total, lo que resulta en el valor de UD.

Observando la figura 26, se puede apreciar que el valor más elevado de uniformidad se alcanza con una mayor presión, concretamente a 3,9 bar, donde se logra un valor de UD cercano al 71,4%. Este valor resulta significativamente más alto en comparación con los otros dos ensayos, en los cuales se observa una disminución considerable de los valores, alcanzando un valor de 56 en el segundo ensayo.

Por último, el tercer ensayo, que se riega con la menor presión, muestra la menor uniformidad de distribución, con un valor de UD reducido a 44. Existe una diferencia notable respecto a la uniformidad del primer ensayo, el cual se llevó a cabo con una mayor presión.

En consecuencia, se puede deducir que a medida que se aumenta la presión en el volante durante el riego, se obtiene una mayor uniformidad de distribución. Los valores reales de uniformidad serían 0,71, 0,56 y 0,54 respectivamente, pero se multiplican por 100 para facilitar su representación en el gráfico y permitir un análisis más adecuado.

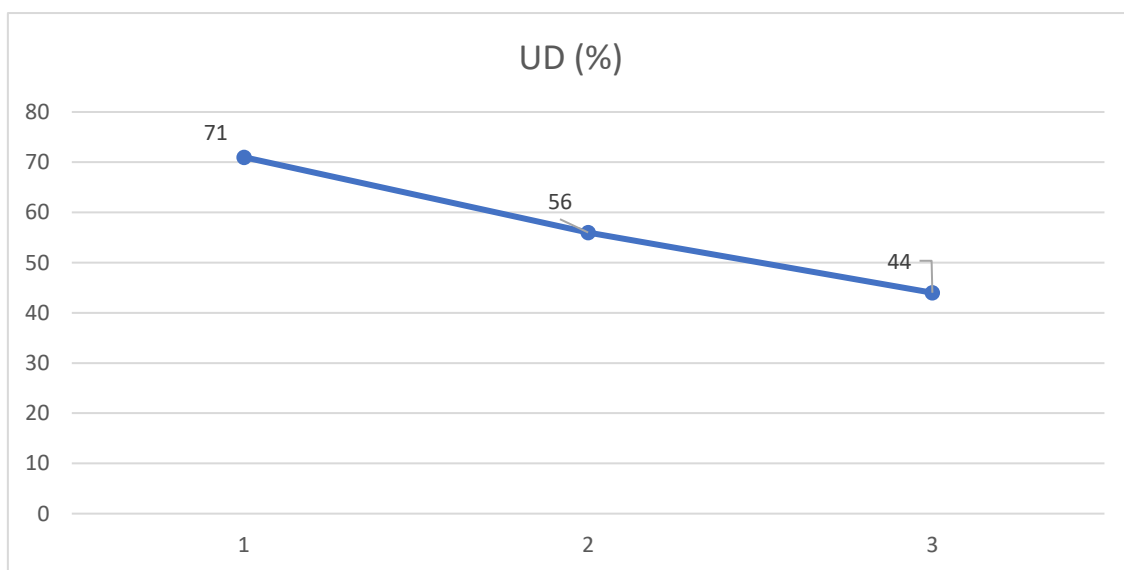


Figura 26. Gráfico de la uniformidad de distribución. Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos en la Excel.

7.12 Eficiencia potencial de riego:

A continuación, procederemos a analizar el parámetro de la eficiencia potencial de riego. Este valor se calcula dividiendo el cuarto inferior (LQ) entre el valor medio aplicado, como se explicará en detalle más adelante.

En la figura 27, se presentan los valores obtenidos para este parámetro, y se puede observar un valor destacado en el primer ensayo, donde se riega con la mayor presión, alcanzando aproximadamente 71.

En el segundo ensayo, se produce un descenso hasta 58, debido a la reducción de 0,5 bar en la presión. Esta disminución no es tan pronunciada en comparación con la que se observa en el tercer ensayo, donde la eficiencia potencial baja en alrededor de 13 unidades.

Por último, en el tercer ensayo se produce la reducción más significativa, llegando a un valor muy bajo de 31. La disminución entre el segundo y el tercer ensayo se puede apreciar como considerable, con un descenso de cerca de 27 unidades, lo que representa una reducción casi del 50% en el valor de la eficiencia potencial de riego al compararlo con el ensayo realizado a menor presión de los tres.

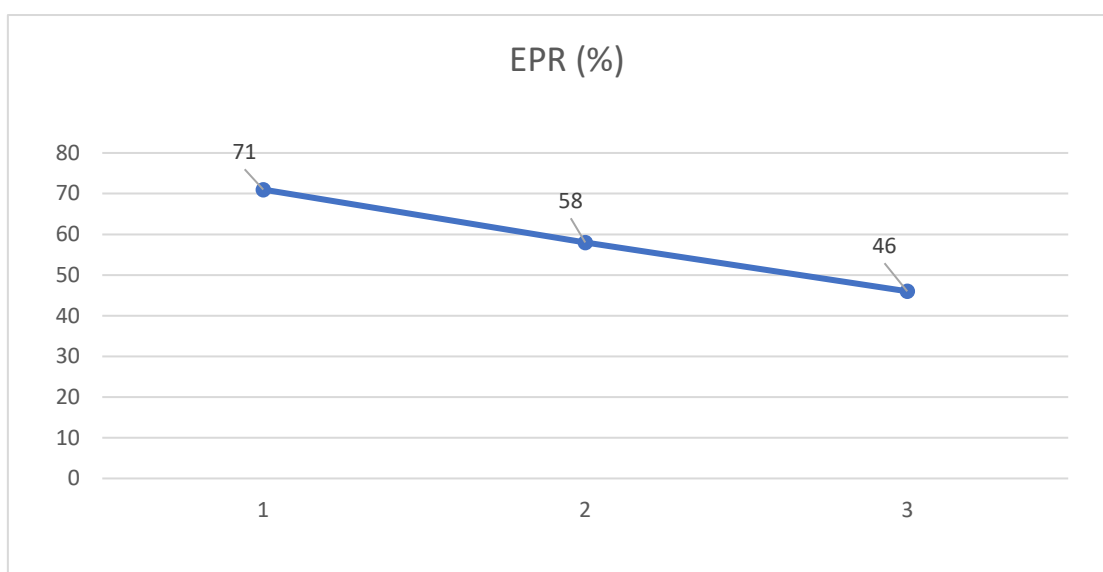


Figura 27. Gráfico de la eficiencia potencial de riego. Fuente: Elaboración propia con los valores obtenidos en la Excel.

7.13 Coeficiente de uniformidad:

A continuación, procederemos a analizar el coeficiente de uniformidad, y se puede observar que la mayoría de los datos siguen una tendencia similar, con valores destacados en el primer ensayo, un ligero descenso en el segundo ensayo y una notable disminución en el tercero.

El coeficiente de uniformidad se calcula dividiendo la desviación total entre la media total, multiplicada por el número de vasos utilizados en el área regada (en este caso, 75). Luego, se resta este resultado de 1 y se multiplica por 100 para obtener valores más representativos en las gráficas.

Una vez que comprendemos cómo se calcula el coeficiente de uniformidad, podemos observar en la figura 28 que en el primer ensayo se alcanza un valor bastante elevado, aproximadamente 78,23.

En el segundo ensayo, se produce un ligero descenso hasta llegar a 74,38. Este descenso es bastante pequeño y apenas se traduce en grandes pérdidas de uniformidad. Sin embargo, en el tercer ensayo se observa una marcada

disminución, llegando a un valor de 56, es decir, una reducción de alrededor de 18 unidades. Este descenso tan pronunciado es consecuencia de la brusca disminución de la presión en el volante durante dicho ensayo.

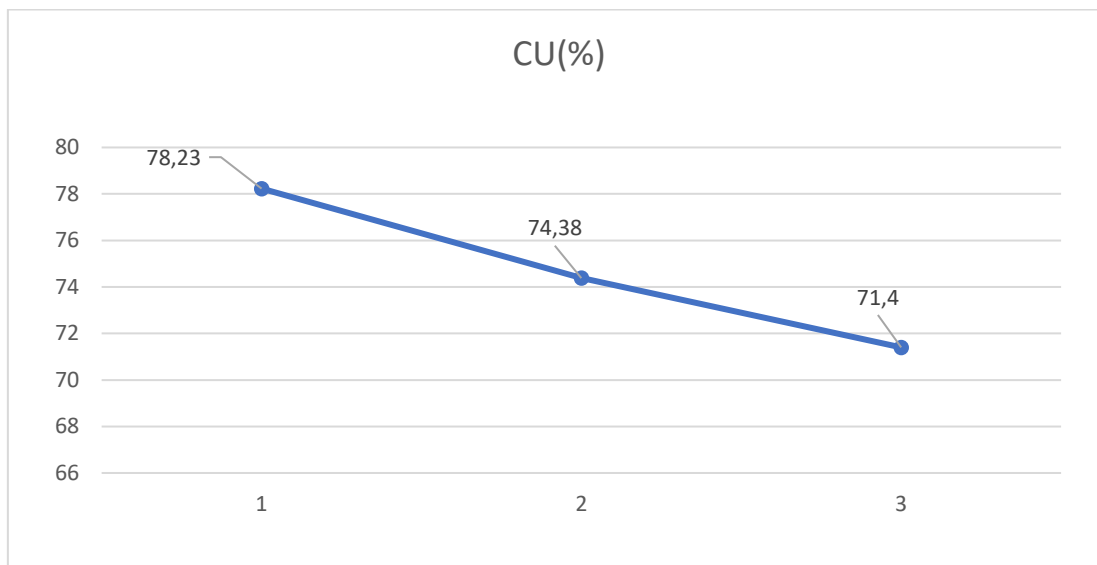


Figura 28. Gráfico del coeficiente de uniformidad. Fuente: Elaboración propia

7.14 Valor medio recogido:

En relación al valor medio recogido, se tomará en consideración la media total de las mediciones obtenidas en cada uno de los vasos utilizados. Como se mencionó anteriormente, se emplearon 75 vasos en el área de riego.

En este aspecto, no se observan alteraciones muy pronunciadas. Esto indica que no hay una diferencia significativa entre el valor medio obtenido en el primer ensayo y el segundo ensayo. Sin embargo, en el tercer ensayo se produce un descenso considerable en comparación con los dos anteriores, como se puede apreciar en la figura 29.

En el primer ensayo, se obtiene un valor medio de 50,3. En cambio, en el segundo ensayo se registra un descenso mínimo de unas décimas, llegando a alcanzar los 49,7. Como se mencionó anteriormente, esta reducción es bastante pequeña, lo que sugiere que el descenso de 0,5 bar en la presión no afecta de manera significativa al valor medio recogido posteriormente.

No obstante, en el tercer ensayo se observa una disminución considerable al producirse un descenso tan brusco en la presión, llegando a alcanzar un valor tan bajo como 31,2.

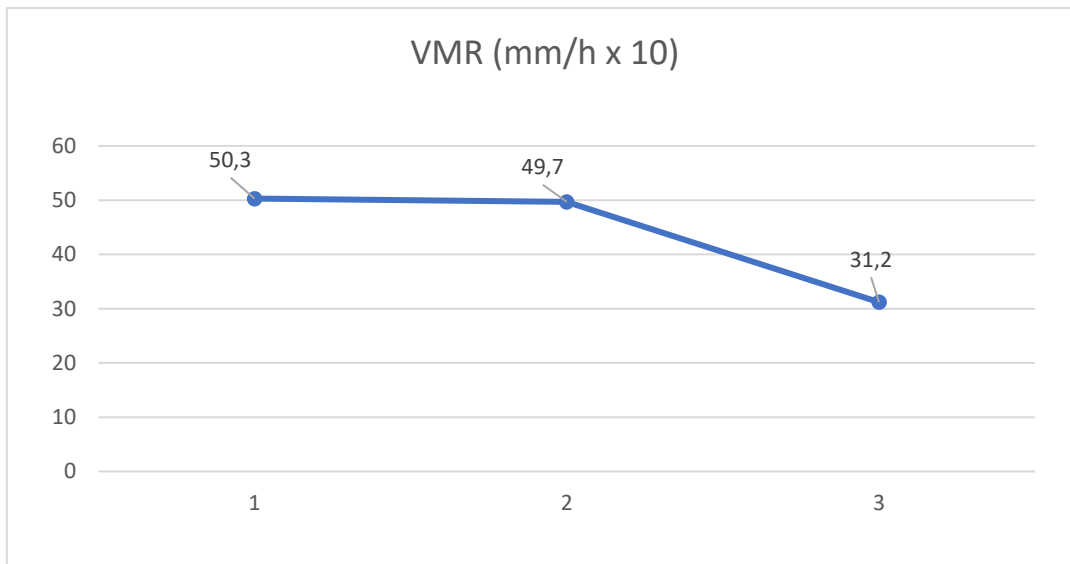


Figura 29. Gráfico del valor medio recogido. Fuente: Elaboración propia

7.15 Valor medio aplicado:

El último parámetro que será analizado es el valor medio aplicado. Este valor se obtiene mediante la multiplicación del caudal por el tiempo de riego, y posteriormente se divide por el área que riega. El caudal utilizado se obtuvo de un catálogo de aspersores, donde se encontraban los aspersores VYR-35, que forman parte del sistema de riego de esta área en particular. El tipo de boquilla utilizada en este campo es de 2,4-4,8. Sin embargo, en el catálogo no se proporcionaba el caudal exacto para este tipo de boquilla. Por lo tanto, se decidió utilizar el aspersor con boquilla 2,4-4,4, ya que en la boquilla de mayor tamaño la diferencia era mínima. Se seleccionó el valor más cercano al rango de 2,4-4,8 basándose en la boquilla de mayor tamaño.

En la figura 30 se puede observar cierto descenso en cada uno de los ensayos realizados, pero estas diferencias no son significativas. En el primer ensayo, se alcanza un valor de 50,6. En el segundo ensayo, la disminución es mínima, llegando a los 48,1. Por último, en el tercer ensayo, el valor desciende hasta los 44,6, representando una reducción de alrededor de 6 cifras en comparación con el primer ensayo.

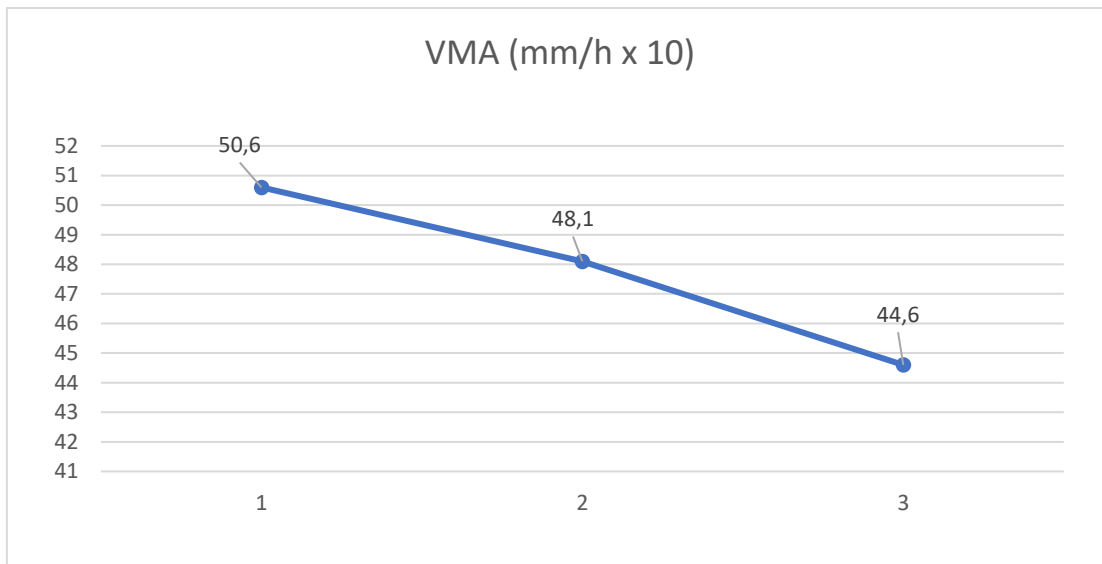


Figura 30. Gráfico del valor medio aplicado. Fuente: Elaboración propia.

7.16 Todos los parámetros:

En la figura 31 se recopilan el conjunto de variables estudiadas, representando gráficamente su variabilidad con respecto a la presión de trabajo.

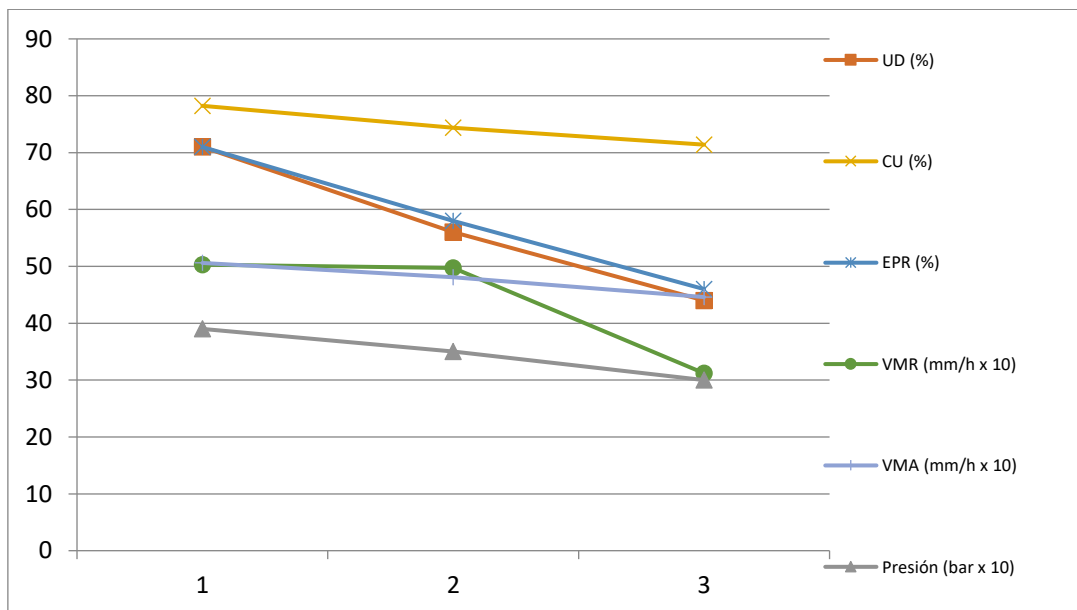


Figura 31. Gráfico de todos los parámetros. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se puede observar el efecto de la disminución de la presión en los aspersores sobre todos los parámetros estudiados, relacionados con la uniformidad y con la cantidad de agua que se aplica. Los resultados obtenidos son coherentes con lo esperable teóricamente y con el conjunto de ensayos prácticos referidos en el apartado de introducción de este documento.

8. Discusión y conclusiones

Se han realizado tres estudios de pluviometría con tres presiones de alimentación diferentes (3.9, 3.5 y 3.0 bar). En cada uno de ellos, se ha obtenido la distribución pluviométrica del agua emitida por los aspersores, y a partir de ella se han calculado las desviaciones y los parámetros relacionados con la uniformidad y con la cantidad de agua de riego aplicada y recogida.

Los ensayos se realizaron en una finca donde se estaba cultivando cebada. Pese a que el cultivo todavía no estaba muy desarrollado, se encontraron dificultades derivadas de la presencia de las plantas de cebada. En las inmediaciones de cada vaso de recogida de agua, se intentó retirar o apartar la masa vegetal, pero aún así resultó inevitable que las plantas pudieran hacer en algunos casos un “efecto pantalla”, impidiendo que una parte del agua entrara en los vasos, o un efecto contrario de salpicadura, donde el impacto del agua contra la planta podría haber hecho que una parte de ella pudiera entrar a los vasos indirectamente.

Esta circunstancia podría explicar algunos resultados imprecisos. Por ejemplo, en el tercer ensayo el valor de VMR se aparta notablemente de VMA, cuando lo esperable es que ambos valores sean similares. Precisamente en el tercer ensayo, el cultivo se encontraba más desarrollado que en los otros dos, lo que pudo acentuar el “efecto pantalla” descrito.

No obstante, en general se observan resultados coherentes y esperables en los que la pluviometría disminuye al disminuir la presión de alimentación, disminuyendo también su grado de uniformidad.

Entre el primer ensayo (3.9 bar) y el segundo (3,5 bar), ya se observan diferencias apreciables en la uniformidad del riego, bajando la UD de 71% a 56% y la CU de 78% a 74%. Este descenso en la uniformidad probablemente tendría un efecto negativo en la producción de la explotación, por lo que se desaconseja en este caso reducir la presión de alimentación.

Los valores de uniformidad obtenidos en el primer ensayo son suficientemente elevados como para considerar correcta la presión de 3.9 bar. Esto conduce a la recomendación de que en fincas similares con presiones elevadas de alimentación, con el mismo tipo de aspersor, marco y altura de caña, la presión podría rebajarse al valor de 3.9 bar. De esta manera, el gasto energético sería menor y previsiblemente la producción no se vería afectada.

9.Bibliografía

- Brennan, D. 2008. Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. *Irrig Sci* 26: 109-119.
- Bui, E.N., Box, J.J.E., 1992. Stemflow, rain throughfall and erosion under canopies of maize and sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 (1), 242–247
- Canone, D., Previati, M. and Ferraris, S., 2017. Evaluation of stemflow effects on the spatial distribution of soil moisture using TDR monitoring and an infiltration model. *J. Irrig. Drain Eng.*, 143(1): 04016075.
- Cavero, J., L. Jiménez, M. Puig, J.M. Faci, and A. Martínez-Cob. 2008. Maize growth and yield under daytime and nighttime solid-set sprinkler irrigation. *Agron. J.* 100:1573–1579. doi:10.2134/agronj2008.0092
- Christiansen, J.E., 1942. Irrigation by sprinkling. *Agric. Exp. Stn. Bull.* 670. Univ. of California, Berkeley.
- Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Faci, J. and Martínez-Cob, A., 2003. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and corn yield. *Irrig. Sci.*, 22, 67-77.
- Dogan, E., Kirnak, H., Doyan, Z., 2008. Effect of varying the distance of collectors below a sprinkler head and travel speed on measurements of mean water depth and uniformity for a linear move irrigation sprinkler system. *Biosyst. Eng.* 99(2), 190–195.
- Fernández García, I., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., Montesinos, P., 2013. Optimal operation of pressurized irrigation networks with several supply sources. *Water Resour Manage.* 27, 2855–2869.
- Heermann D. F. and Hein. PR (1968). Self-propelled center pivot sprinkler system performance characteristic. *operations of the ASAE* 11(1).p.p. 11-15.
- Hupet, F. and Vanclooster, M., 2005. Micro-variability of hydrological processes at the maize row scale: implications for soil water content measurements and evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 303: 247–270.
- Keller, J. and Bliesner, R.D. (1990) *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- Kincaid, D.C., 1991. Impact sprinkler pattern modification. *Trans. ASAE* 34 (6), 2397-2403.
- Lamm, F. R., and Manges, H. L., 2000. Partitioning of sprinkler irrigation water by a maize canopy. *Trans. ASAE*, 43(4), 909-918.
- Li, J. and Kawano, H., 1996. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation. *Agric. Water Manage.* 32, 29–36.

- Li, J. and Rao, M., 2000. Sprinkler water distributions as affected by winter wheat canopy. *Irrig.Sci.*, 20(1), 29-35.
- Liu, H., Zhang, R., Zhang, L., Wang, L., Li, Y., Huang, G., 2015. Stemflow of water on maize and its influencing factors. *Water Manag.*, 158, 34–41.
- Martello, M., Dal Ferro, N., Bortolini, L., Morari, F., 2015. Effect of incident rainfall redistribution by maize canopy on soil moisture at the crop row scale. *Water (open Access)*, 7, 2254–2271.
- Martínez-Cob, A., Playán, E., Zapata, N., Caverro, J. Medina, E. T. and Puig, M. 2008. Contribution of evapotranspiration reduction during sprinkler irrigation to application efficiency. *J. Irrig. y drenaje. Ing., ASCE*, 134 (6): 745-756.
- Mateos, L., Mantovani, E.C.; Villalobos, F.J., 1997. Cotton response to non-uniformity of conventional sprinkler irrigation. *Irrig.Sci.* 17, 47–52.
- Merriam J.L. Keller J. (1978). Evaluación del sistema de riego agrícola: una guía para la gestión: Universidad estatal de UTAH. Logan. Utah. EE.UU
- Montazar, A. and Sadeghi, M. 2008. Effects of applied water and sprinkler irrigation uniformity on alfalfa growth and hay yield. *Agric. Water Manag.* 95(11): 1279-1287.
- Moreno, M.A., Ortega, J.F., Córcoles, J.I., Martínez, A., Tarjuelo, J.M., 2010. Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. *Irrig.Sci.* 28, 445–460.
- Norman, J. M. and Campbell, G. 1983. Application of a plant-environment model to problems in irrigation. *Advances in irrigation*, D. Hillel, ed., vol. 2, Academic, New York, 155–188.
- Paltineanu, I. C., and Starr, J. L., 2000. Preferential Flow through maize canopy and soil water dynamics across rows. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64(1), 44–54.
- Paniagua, M.P., 2015. Mejora del riego por aspersión en parcela. Dissertation. Universidad de Zaragoza, 261 p (in spanish).
- Ring L., Heermann D.F. (1978) Determining center pivot sprinler uniformities. ASAE. Paper 78-2001.
- Robles, O., Playán, E., Caverro, J. and Zapata, N., 2017. Assessing low-pressure solid-set sprinkler irrigation in maize. *Agric. Water Manag.*, 191, 37–49.
- Rodríguez Díaz, J.A., López Luque, R., Carrillo Cobo, M.T., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., 2009. Exploring energy saving scenarios for on demand pressurized irrigation networks. *Biosystems. Eng.* 104, 552–561.

- Salvador, R., Bautista, C., Burguete, J, Zapata, N., Serreta, A. and Playán, E. 2009.A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers. *Irrig Sci.*, 27: 307–317.
- Sánchez, I., Zapata, N., Faci, J.M., 2010.Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation:I.Irrigation performance and soil water recharge in alfalfa and maize. *Agric.Water Manag.* 97(10), 1571–1581.
- Seginer, I. 1978.Note on economic significance of uniform water application. *Irrig Sci.*, 1: 19-25.
- Stambouli T., Martínez-Cob A., Faci J.M., Howell T.A. and Zapata N., 2013.Sprinkler evaporation losses in alfalfa during solid-set sprinkler irrigation in semiarid áreas. *Irrig Sci* 31(5):1075-1089. DOI 10.1007/s00271-012-0389-2.
- Steiner, J.L., Kanemasu, E.T., Clark, R.N., 1983.Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system. *Trans. ASAE* 26 (4), 1128–1134.
- Stern, J., Bresler, E., 1983.Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield.*Irrig.Sci.* 4 (1), 17–29.
- Sun, Z., Li, Z., Li,B., Sun, T. and Wang, H., 2017. Factors Influencing Corn Canopy Throughfall at the Row Scale in Northeast China. *Agron. J.* 109:1591–1601.
- Tarjuelo J.M. (1995) El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa
- Tokay, A., Wolf, D. B., Petersen, W.A., 2014. Evaluation of the New Versiono f the Laser-Optical Disdrometer,OTT Parsivel(2).*Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(6), 1276–1288.
- Urrego-Pereira, Y.F., Martinez-Cob, A., Fernandez, V., Cavero, J. 2013.Daytime Sprinkler Irrigation Effects on Net Photosynthesis of Maize and Alfalfa. *Agron. J.* 105(6): 1515–1528.
- Van Wesenbeeck, I. J., and Kachanoski, R. J., 1988.Spatial and temporal distribution of soil water in the tilled layer under a maize crop. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 52(2), 363-368.
- Van Wesenbeeck, I. J., Kachanoski, R. J. and Rolston, D. E., 1988.Temporal persistence of spatial patterns of soil water content in the tilled layer under a maize crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52(4), 934-941.
- Zapata N., Robles O., Playán E., Paniagua P., Romano C., Salvador R., Montoya F. (2018) Low-pressure sprinkler irrigation in maize: differences in water distribution above and below the crop canopy. *Agricultural Water Management* 203:353-365.