

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y
AGROAMBIENTAL**



**“ESTUDIO DEL MANEJO DEL AGUA DE
RIEGO MEDIANTE SENSORES DE
HUMEDAD”**

TRABAJO FIN DE GRADO

2017

Autor: José Ferrándiz Molina

Tutora: Herminia Puerto Molina

REFERENCIAS DEL TRABAJO FINAL DE GRADO

Identificadores:

Autor: JOSÉ FERRÁNDIZ MOLINA

Título: Estudio del manejo del agua de riego mediante sensores de humedad

Title: STUDY OF IRRIGATION WATER MANAGEMENT WITH SOIL MOISTURE SENSORS

Directora: Herminia Puerto Molina

Año: 2017

Titulación: GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y AGROAMBIENTAL

Palabras clave: sensores, humedad en el suelo, balance hídrico, programación de riegos, riego deficitario

Keywords: sensors, soil moisture, water balance, irrigation scheduling, deficit irrigation.

Resumen:

El manejo de los recursos hídricos es clave en la producción y la rentabilidad de los cultivos en el Alto Vinalopó (Alicante), debido al contexto actual de escasez de agua de la comarca. De ahí, la importancia de estudiar nuevos métodos para la automatización y gestión eficiente del agua en la agricultura. Este trabajo compara los requerimientos hídricos a través de la metodología del balance hídrico, con el consumo de agua gestionado mediante la programación del riego con sondas capacitivas FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) de un cultivo comercial de cerezos (*Prunus avium L.*) en la comarca. El resultado obtenido indica que con la programación del riego mediante sensores humedad se utilizan menos recursos hídricos.

Abstract:

Water resources management is a key element in crop's production and profitability in Alto Vinalopó (Alicante), due to the current context of water scarcity in the region. Hence, the importance of studying new methods for automation and efficient water management in agriculture. This work compares the water requirements through the water balance methodology, with the water consumption managed by irrigation programming with FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) capacitors in a commercial cherry orchard (*Prunus avium L.*) in the region. The results obtained indicate that irrigation through humidity sensors programming consumes less water resources.

AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo Final de Grado se ha realizado en una plantación comercial privada, por lo que agradezco a D. Vicente Navarro Barceló por su colaboración y permitir el ensayo experimental desarrollado.

A Dña. Herminia Puerto Molina, directora de este trabajo, por su colaboración y aportación en el seguimiento del trabajo, su orientación y sus correcciones, siempre dispuesta a ayudarme en cualquier circunstancia.

A MODPOW SL y FERTIADVISOR SL, por su colaboración y apoyo en la elaboración de este trabajo, su consejo y por ser amigos además de compañeros.

Finalmente quisiera acabar dando gracias a la familia que a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica. Y a todos mis amigos y allegados en general, por soportarme y apoyarme.

Seguramente me dejo muchos nombres y personas que me han ayudado, pido disculpas por ello de antemano, y hago extensivo el agradecimiento a todos los que han hecho posible este trabajo.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Situación actual del riego en el Alto Vinalopó	12
1.2	Bases de la programación del riego mediante balance de agua	14
1.3	Métodos basados en el conocimiento del estado hídrico del suelo....	17
1.3.2	Uso de sensores de humedad para la programación del riego	21
1.4	Objetivos.....	29
2	MATERIAL Y MÉTODOS.....	30
2.1	Descripción de la parcela objeto de estudio.....	35
2.2	Datos de los sensores de humedad del suelo	37
2.3	Datos agrometeorológicos	40
2.4	Cálculo de los requerimientos hídricos del cultivo mediante balance de agua	42
2.5	Extracciones de las sondas de succión.....	44
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.1	Resultados obtenidos	47
3.2	Comparación de sistemas de programación del riego.....	51
4	CONCLUSIONES	54
5	BIBLIOGRAFÍA	55
	ANEXOS	59
	Anexo 1: Gráficas de variación del contenido en humedad del suelo, riego aplicado y consumo hídrico diario.....	60
	Anexo 2: Resultados de los nutrientes analizados en la extracción del lisímetro a 30 cm de profundidad	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Porcentajes de humedad en función de la textura del suelo (Adaptada de Saxton y Rawls 2006)	24
Tabla 2: Valores de la curva de humedad asociados a la tensión del suelo (Adaptada del Centro de Tecnología de riego de la Universidad de Fresno)	26
Tabla 3: Datos meteorológicos característicos de la parcela de estudio	36
Tabla 4: Resumen del consumo hídrico del mes de junio de 2017.....	39
Tabla 5: Evapotranspiración de referencia (ET_o) diaria durante el año 2016-2017.....	41
Tabla 6: Precipitación total (P_T) diaria durante el año 2016-2017.....	41
Tabla 7: Duración de las etapas del cultivo del cerezo	43
Tabla 8: Resultado de la conductividad eléctrica, pH y potencial redox obtenidos en las extracciones del lisímetro situado a 30 cm de profundidad. ...	45
Tabla 9: Consumo mensual de agua (mm/ha) en la campaña 2016-2017	47
Tabla 10: Precipitación mensual año 2016-2017.....	48
Tabla 11: Resultados del balance hídrico mediante el programa CROPWAT de FAO.	49
Tabla 12: Requerimientos hídricos mensual (mm/ha) en la campaña 2016-2017	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Porcentaje de superficie ocupada por los principales cultivos en la comarca del Alto Vinalopó. (Fuente: Generalitat Valenciana-Consejería de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio climático y Desarrollo Rural-Informe del sector agrícola Valenciano 2016.).....	13
Figura 2: Formación de bulbo en los diferentes tipos de suelo.....	23
Figura 3: Variación del contenido de humedad en el suelo a 40 cm de profundidad.....	27
Figura 4: Detalle de un registrador de datos (<i>datalogger</i>).....	30
Figura 5: Detalle de la instalación de los sensores FDR a diferentes profundidades.....	32
Figura 6: Curva característica del suelo de la parcela estudiada. Se señalan los límites de capacidad de campo, CC, y límite del agua fácilmente utilizable, AFU.	33
Figura 7: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de junio de 2017.....	37
Figura 8: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) el 22 de julio de 2017 a las 12:00 horas.....	37
Figura 9: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de junio de 2017.....	38
Figura 10: Detalle de la información aportada por el software, relativa a los sensores de humedad en contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) y a la información sobre el caudal aportado en un determinado riego.	38
Figura 11: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de junio de 2017	39

Figura 12: Curva del coeficiente del cultivo del cerezo en relación a la duración de la temporada.	43
Figura 13: Consumo mensual (mm/ha) del estudio 2016-2017.....	48
Figura 14: Requerimientos hídricos del cultivo (mm/ha) 2016-2017.....	50
Figura 15: Comparativa entre el consumo hídrico obtenido mediante la programación del riego con sensores de humedad frente a las necesidades teóricas del cultivo calculadas con el método del balance hídrico.	52



1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día vivimos en un mundo globalizado, donde los mercados son más agresivos y los consumidores más exigentes con la calidad y el precio de los productos. En el sector agrario la presión de los mercados se ha traducido en una exigencia máxima para rentabilidad de los cultivos, por lo que pequeñas variaciones en los costes de producción pueden suponer grandes pérdidas en las explotaciones agrícolas.

El sudoeste español es una de las zonas más áridas de toda Europa, caracterizada por un clima seco con precipitaciones escasas e irregulares, pese a ello es uno de los territorios con más peso en la producción de frutas y hortalizas de España. En la actualidad muchos de estos territorios se encuentran en una situación de déficit hídrico, causado en parte por su climatología y el gran crecimiento de la demografía y de la superficie agrícola. A pesar de la modernización que se produjo a finales del siglo XX, con nuevas técnicas para mejorar la eficiencia del uso del agua y facilitar el manejo mediante la automatización de los sistemas de riego, la situación de déficit hídrico no ha mejorado. El presente de los recursos hídricos del levante español no es muy esperanzador; la inestabilidad política, la contaminación de aguas y la sobreexplotación de los acuíferos han incrementado la sequía.

Además de los problemas intrínsecos del sector agrario, el problema del agua puede llegar a ser un factor limitante para el desarrollo de la actividad agrícola. Estos motivos han llevado a la comunidad científica y a los agricultores a desarrollar herramientas y técnicas para rentabilizar al máximo el uso del agua. Esta nueva metodología está basada en una búsqueda precisa de las necesidades hídricas de los cultivos, con el objetivo de establecer una planificación del riego con las mínimas pérdidas de agua posibles o plantear de riegos deficitarios que no comprometan la productividad de los cultivos.

1.1 Situación actual del riego en el Alto Vinalopó

El Alto Vinalopó es una comarca interior de la Comunidad Valencia (España) está situada en el noroeste de la provincia de Alicante, tiene una superficie de 664,72 km². Está compuesta por 7 municipios; Villena, Sax, Biar, Benejama, Salinas, Cañada y Campo de Mirra. Su nombre proviene del río Vinalopó que nace en la Sierra de Mariola, atraviesa toda comarca y gran parte de la provincia para desembocar en el mar Mediterráneo. Las precipitaciones son, en general, escasas y muy irregulares, pero más abundantes en el norte que en el sur. Además, el clima es claramente mediterráneo continentalizado, con un fuerte contraste térmico entre el verano y el invierno

Históricamente el Valle del Vinalopó siempre estado ligado a una situación de escasez de agua, en la última mitad del siglo XX a pesar de los avances técnicos en la extracción de aguas subterráneas se acentuó el déficit hídrico. El aumento de la superficie de riego y la exportación de agua a comarcas vecinas como el Bajo Vinalopó y el Alacantí, junto con el crecimiento de población y la actividad industrial provocaron una fuerte presión en los acuíferos. Estas causas impulsaron la incorporación de la zona en 1996 al Plan Hidrológico de la demarcación del Júcar, para intentar paliar la sobreexplotación de los acuíferos.

La explotación del agua en la comarca es compleja debido a la diversidad de recursos hídricos existentes. Básicamente el Alto Vinalopó se sustenta gracias a una red de numerosos embalses conectados entre sí, que se abastecen de fuentes de distinta procedencia. Gran parte de la dotación hídrica proviene del río Vinalopó, que cubre la mayoría de necesidades del valle, exceptuando las localidades de Salinas, Sax y parte del término de Villena, que se sustentan con las aportaciones del trasvase Júcar-Vinalopó y como alternativa con

aguas residuales urbanas procedentes de depuradora. Los sondeos de aguas subterráneas se producen cuando los recursos de agua anuales se agotan, estos dependen en gran parte de las precipitaciones anuales. Estas extracciones de los acuíferos encarecen el precio del agua de riego debido a la energía utilizada en los bombeos, presionando económicamente a los agricultores que se ven obligados a aumentar la rentabilidad de sus cultivos.

Actualmente el Alto Vinalopó representa un 15% de la tierra cultivada de la Provincia de Alicante, con una superficie de 20.689 ha de las cuales; 12.253 ha son de secano y 8.436 ha son de regadío. Su dotación de agua no es suficiente para abastecer la demanda agrícola, por lo que requiere la aportación de recursos foráneos al sistema hídrico tradicional.

PRINCIPALES CULTIVOS DEL ALTO VINALOPO

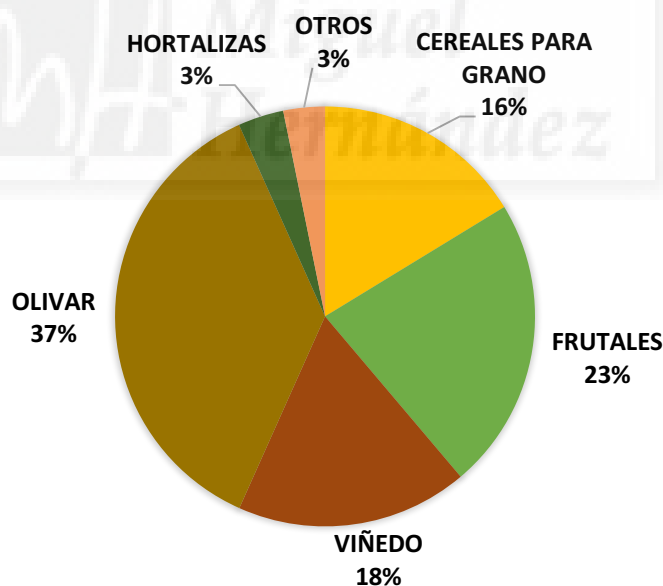


Figura 1: Porcentaje de superficie ocupada por los principales cultivos en la comarca del Alto Vinalopó. (Fuente: Generalitat Valenciana-Consejería de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio climático y Desarrollo Rural-Informe del sector agrícola Valenciano 2016.)

1.2 Bases de la programación del riego mediante balance de agua

Uno de los objetivos de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en el ámbito de la agricultura es desarrollar métodos para aumentar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, realizando investigaciones para avanzar en la determinación la necesidad de agua de los cultivos. La publicación n°56 del estudio de la FAO de Riego y Drenaje, expone el método de cálculo de Penman-Monteith un método preciso para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) diaria (mm/día). Al estar basada en datos climáticos, muchas organizaciones relacionadas con la información agroclimática ya proporcionan el cálculo de la evapotranspiración de referencia. El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de simplificar la metodología, debido a los costosos estudios para catalogar las características de los cultivos principales. Según la FAO, el cálculo de la ET_0 se corresponde con la cantidad de agua consumida por una superficie extensa de prado verde y de altura uniforme.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

ET_0 = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa)

R_a = Radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

e_a = Presión real de vapor (kPa)

G = Flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

Δ = Pendiente de la curva de presión vapor (kPa °C⁻¹)

T = Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

Para determinar las necesidades hídricas de un cultivo determinado, se utiliza el término del coeficiente de cultivo (K_C). Este coeficiente sirve como una integración de todas las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos, es el resultado del cociente entre la evapotranspiración del cultivo (ET_C) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_O) representando los aspectos que diferencian a un cultivo determinado respecto al prado de referencia.

$$ET_C = ET_O * K_C$$

Estas características específicas de los cultivos vendrán determinadas por las diferencias morfológicas y fisiológicas que un cultivo desarrolla a largo de su período de crecimiento, en conjunto con la respuesta a las condiciones climáticas y los factores implicados en la transpiración del suelo que se produzcan en dicho periodo de desarrollo.

La programación del riego mediante el balance hídrico está considerada como uno de los métodos más exactos para programar un riego, ya que tienen en cuenta el flujo del agua desde el suelo (fuente) pasando por las plantas hasta la atmosfera (sumidero). Se basa en la diferencia entre las ganancias y las pérdidas aportadas a un determinado volumen de suelo, obteniendo los aportes hídricos necesarios para que el rendimiento del cultivo no se vea afectado. Es un sistema de programación bastante completo debido a que toma datos de las tres partes del conjunto suelo-planta-atmosfera:

Los datos climáticos que se requieren son la evapotranspiración de referencia (ET_O) y de la precipitación (P_T) se pueden tomar de una estación meteorológica cercana al lugar del estudio.

Del suelo donde se establezca el cultivo serán necesarios determinar el nivel de agua útil y el nivel de agotamiento permisible. Además de la textura, estructura, volumen de agua en capacidad de campo y en el punto de marchitez. Para finalizar será necesario conocer las necesidades hídricas adecuadas en cada etapa de su ciclo de crecimiento y desarrollo. Estas vienen determinadas por los coeficientes de cultivo recogidos en método FAO 56 (Allen et al, 2006).

$$Nn = ET_c - P_e \pm \Delta w$$

Las necesidades hídricas de una planta vendrán determinadas por la diferencia entre demanda de la evapotranspiración de un determinado cultivo (ET_c) calculada con los coeficientes establecidos por la FAO, y la precipitación efectiva (P_e) que es la fracción de lluvia que realmente queda a disposición de la planta en la zona explorada por las raíces. La variación de contenido en agua del suelo (Δw) generalmente será negativa ya que habrá ido disminuyendo con el paso de los días, en la reserva de agua las pérdidas superan a las entradas, excepto en suelos con una capa freática muy cercana a la superficie donde puede haber ascenso por capilaridad siendo este incremento positivo. En el sistema de riego por goteo se puede considerar como cero. Términos como la escorrentía y la percolación profunda suelen tener una escasa influencia salvo en circunstancias muy concretas, luego no supone un grave error prescindir de ellos en las condiciones de este estudio.

1.3 Métodos basados en el conocimiento del estado hídrico del suelo

Como hemos comentado anteriormente, uno de los principales problemas del sector agrícola del sudeste español es la disponibilidad de agua de riego. En consecuencia, el agua disponible para aportar a los cultivos se deberá utilizar de un modo más eficiente y racional. Esta necesidad motiva el desarrollo de tecnologías que permitan incrementar las disponibilidades de agua propiciando su mejor aprovechamiento como una exigencia ineludible (Navarro Caballero, 2010). Estas necesidades e inquietudes han llevado en los últimos años a la comunidad científica y al sector agrícola a desarrollar elementos más prácticos y precisos (electroválvulas, contadores digitales, programadores...) para el manejo del riego. La necesidad de optimizar recursos agrícolas como es el caso del agua, sugiere la automatización y monitorización de los sistemas de riego tradicionales.

La programación de riegos, se basa en la determinación de la cantidad de agua y el momento de aplicación. Estos criterios deben ser precisos para obtener la mayor eficiencia posible del uso del agua, y evitar así pérdidas asociadas a la productividad del cultivo relacionadas con un mal uso del agua; pérdidas de agua por percolación, lavado de sales y problemas de encharcamiento que causen enfermedades de suelo.

Los métodos basados en el conocimiento del estado hídrico del suelo permiten establecer una tendencia de riego fijando unos niveles máximos y mínimos en función del contenido de agua en el suelo. El objetivo de cada riego es alcanzar un volumen de agua que sea fácilmente asimilable para las raíces. Se aplica un nuevo riego cuando los niveles de humedad del suelo llegan a valores que permitan un agotamiento hídrico que no comprometan la productividad del cultivo (Romero et al., 2006; Ruiz Sánchez, et al., 2010).

1.3.1.1 Método gravimétrico

Consiste en calcular la humedad gravimétrica existente en el suelo por diferencia de peso. Se obtiene una muestra de suelo en condiciones naturales y se pesa, después se seca en la estufa a 105 °C durante 24 horas, y se vuelve a pesar, obteniendo así el porcentaje de humedad en el suelo.

$$\theta_g(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Es un método simple muy utilizado dada su fiabilidad, sus principales ventajas son la facilidad de manejo y cálculo. Sus inconvenientes son la incapacidad de tomar medidas en continuo y la destrucción del área estudiada.

1.3.1.2 Tensiómetros

Permiten medir la tensión a la que está retenida el agua en el suelo. Su funcionamiento está basado en crear una columna de agua que interactúe con el suelo gracias a su punta cerámica porosa. A medida que el suelo se seca, comienza a succionar agua del tensiómetro, provocando de esta manera una tensión. Esta tensión es medible gracias a que en el extremo de los tubos cilíndricos se coloca un manómetro, que miden el esfuerzo que las raíces realizan para extraer agua del suelo. Si se instalan tensiómetros a varias profundidades se puede conocer el movimiento del agua a través de los horizontes del suelo.

Es un método exacto y sencillo, que permite determinar el momento de aplicación de un riego. Como inconvenientes cabe destacar que necesitan un mantenimiento periódico y requieren calibración, además no pueden exponerse en campo durante el invierno para evitar que se congelen.

1.3.1.3 Sonda de Neutrones

Está basada en la dispersión de neutrones en el suelo, mediante una sonda radiactiva que se introduce en el perfil del suelo, se emiten neutrones de alta energía, que chocan con los átomos de alrededor.

Los átomos de gran tamaño rebotan conservando la velocidad, pero los átomos de masa similar, se vuelven más lentos porque pierden la mitad de su energía inicial, se termalizan. Los neutrones termalizados o desacelerados son aproximadamente iguales a los átomos de hidrogeno, compuesto principal del agua. Ya que junto a la sonda se introduce un sensor que detecta el intercambio de los neutrones, podemos conocer el volumen de agua en el suelo con un margen de error muy pequeño. Pese a su precisión, necesita de calibración para cada tipo de suelo, su precio y la utilización de material radiactivo son sus desventajas frente a otros métodos.

1.3.1.4 Sensores de Resistencia Eléctrica

Se fundamentan en determinar tensión del agua gracias a las variaciones de la resistencia eléctrica del suelo. Los sensores se entierran a la profundidad deseada, midiendo la corriente eléctrica formada entre dos electrodos en contacto con el suelo mediante un elemento poroso. Cuanto mayor sea el contenido de agua en el suelo mayor será la conductividad eléctrica y menor la resistencia del suelo, debido a que todos los suelos no son iguales se deberán calibrar los sensores. Su uso es limitado debido a que la conductividad depende de la textura de los suelos, en horizontes con poca retención del contenido de agua su precisión disminuye.

1.3.1.5 Sondas TDR Y FDR

Son métodos que a través de la constante dieléctrica o permitividad del suelo nos permiten conocer su contenido de humedad. Estos instrumentos se basan en la reflectometría del sistema aire-agua-suelo las sondas TDR (*Time Domain Reflectometry*) en la relación respecto al tiempo y las sondas FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) respecto a la capacitancia. La influencia que tiene el agua en la permitividad dieléctrica del suelo es mucho mayor que la del aire, el suelo o la materia orgánica. Estos sistemas miden las variaciones en forma de ondas electromagnéticas causadas por el contenido de agua en el suelo.

Las sondas TDR obtienen el contenido de humedad del suelo en función del tiempo. Emiten pulsos electromagnéticos y calculan el periodo de tiempo en que la onda tarda en regresar, el tiempo es proporcional a la permitividad del medio y varía con la presencia de agua en el suelo. Si suelos salinos o con un alto contenido de materia orgánica varían las condiciones de la constante dieléctrica del suelo los sensores deberán calibrarse.

Las sondas FDR pueden ser enterradas directamente en el perfil del suelo o a través de un tubo de acceso, los sensores están conectados mediante a un cable a un registrador de datos que permiten el almacenamiento de datos. Se basan en las capacitancias de los elementos del suelo transformando las variaciones de frecuencia que sufren en el contenido de humedad en el suelo. Son instrumentos novedosos que permiten tomar medidas precisas en continuo, pueden instalarse en distintos horizontes del suelo. No son métodos destructivos, por lo que su mayor desventaja es que solo abarcan un pequeño volumen de suelo.

1.3.2 Uso de sensores de humedad para la programación del riego

Los sensores de humedad basan su funcionamiento en las variaciones físico-químicas que experimenta el complejo del suelo en presencia de agua. Dicha presencia de agua viene condicionada por múltiples factores; como las necesidades hídricas de la planta, los factores climáticos y la morfología del terreno. La base de la programación de riego mediante la utilización de sensores, pretende aportar información del contenido de agua presente en el suelo con la finalidad de tomar decisiones a la hora de establecer un régimen hídrico. En consecuencia, los aspectos más relevantes para el uso e instalación de los sensores son aquellos que dependen del suelo (características físico-químicas, textura y morfología del terreno). Cuanto más conocimiento tengamos de estos aspectos, menor será el error a la hora de instalar y utilizar los sensores, y mayor será su rendimiento. Hoy en día contamos con muchas herramientas y métodos para conocer la tipología de los diferentes suelos donde se va a llevar a cabo alguna actividad agrícola, por ejemplo:

- La experiencia adquirida por los agricultores sobre la orografía de la parcela y la especie/variedad cultivada.
- Catas en suelo para conocer la profundidad de las raíces y su desarrollo.
- Análisis de suelos para conocer la textura y la composición físico-química.
- Mapas de suelo, como los existentes en el Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Técnicas como pueden la teledetección aérea mediante vuelo de drones o avionetas, con cámaras térmicas o multispectrales, que nos permitan crear mapas de vigor de los cultivos.

Para la utilización de las sondas de humedad es clave conocer la textura del suelo, que se emplea como parámetro de referencia para determinar la retención y el movimiento del agua a través de los horizontes del suelo. En riego por goteo, se llama bulbo húmedo al volumen de suelo humedecido por un emisor de riego localizado. El movimiento del agua en el suelo determina la forma y el tamaño del bulbo húmedo, que tiene una gran importancia, ya que en él se desarrolla mayor porcentaje el sistema radical de las plantas (Fuentes, 1991). El tamaño de los poros está ligado a la textura y determina la capacidad de retención de un suelo. En suelos arenosos los poros son de gran tamaño y el agua circula con mayor facilidad, mientras que en los suelos arcillosos se extiende con mayor facilidad hacia los lados. En consecuencia, en suelos arenosos el bulbo tiene forma alargada y en los suelos arcillosos achatada.

En función de la tipología del bulbo se debe considerar la distancia a la que se colocaran las sondas respecto del emisor para que la toma de datos sea lo más precisa posible (Zúñiga, 2004), en terrenos arenosos la formación de raíces está más cercana al emisor debido a que el bulbo es más alargado y estrecho, en estos casos situaremos las sondas a 10-15 cm. Por el contrario, en los suelos arcillosos el recorrido del agua a través de las capas del suelo es mucho más horizontal, son suelos que retienen el agua con mucha fuerza y en gran cantidad, por ello debemos situar las sondas un poco más alejadas del emisor a 20-25 cm.

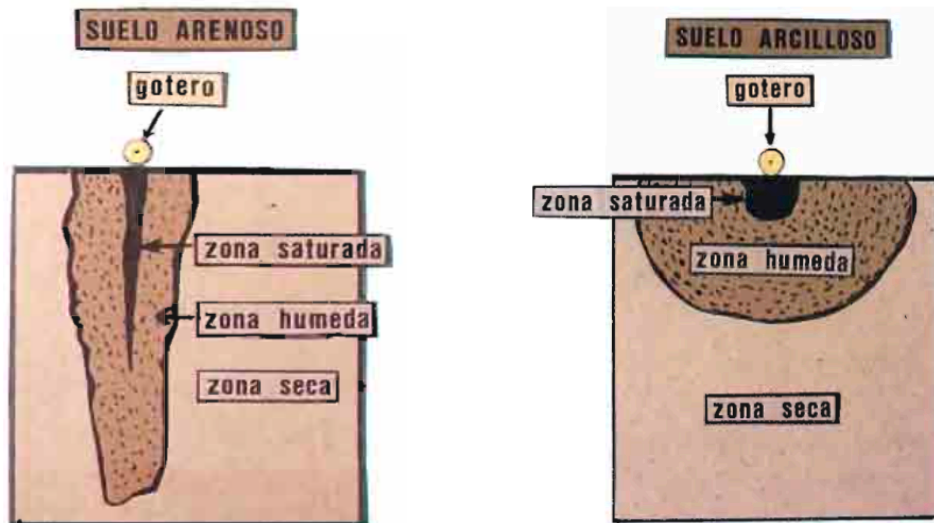


Figura 2: Formación de bulbo en los diferentes tipos de suelo.

Numerosos autores como Thompson et al. (2007) dictaminan que la capacidad de campo es el objetivo que se debe establecer en una dinámica de riego, donde el suelo retenga toda el agua aportada evitando así la pérdida del agua gravitacional. Pero mediante las experiencias en campo se observa que la aplicación de riegos prolongados, buscando alcanzar la saturación del suelo y a su vez permitiendo la oxigenación con una frecuencia de riegos adecuada provoca una mejor respuesta en el crecimiento de las plantas. Las raíces tienen un mayor desarrollo, absorbiendo rápidamente parte del agua que esta retenida con menor fuerza y finalmente se perderá por percolación. Si queremos cubrir estas necesidades en cada riego el primer paso para planificar el riego con las sondas de humedad es definir el punto de saturación, la capacidad de campo y un nivel de agotamiento permisible y asociarlos a unos porcentajes de humedad. Nuestro objetivo al aplicar un riego será alcanzar el máximo contenido de agua que un suelo puede almacenar, sin perder agua por percolación. Para establecer los diferentes parámetros del contenido de agua en el suelo comenzaremos por la saturación del suelo. Una vez establecido el punto de saturación, y finalizado el riego, con el paso de los días las observaremos mediante el software que los niveles de humedad comienzan a disminuir.

Esta bajada del nivel de agua en el suelo permite que los poros antes ocupados por agua lo empiecen a estar de aire, es lo que denominamos capacidad de campo. La disminución del contenido de agua en el sistema edáfico se produce por el fenómeno de la evapotranspiración de los cultivos y en menor medida, por la transpiración del suelo y de la fracción del agua gravitacional que las raíces no son capaces de absorber. Para que la productividad de los cultivos no se vea afectada por falta de agua en el suelo, se debe definir un nivel de agotamiento permisible para que las raíces de las plantas encuentren siempre agua disponible. El nivel de agotamiento permisible puede variar en función de la respuesta frente al estrés que queramos provocar a las plantas. Podemos encontrar infinidad de tablas y estudios que relacionan la textura del suelo con el porcentaje de humedad asociado a los valores de referencia; (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, punto de saturación). Es recomendable seguir las indicaciones que dicta el fabricante de los sensores empleados, en este caso se recomiendan las relaciones establecidas por Saxton y Rawls (2006)

Tabla 1: Porcentajes de humedad en función de la textura del suelo (Adaptada de Saxton y Rawls 2006)

Textura	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente
	(%VWC)	(%VWC)
Arena	10	5
Arenoso-Franco	12	5
Franco-Arenoso	18	8
Franco-Arcillo-Arenoso	27	17
Franco	28	14
Arcillo-Arenoso	36	25
Franco-Limoso	31	11
Limo	30	6
Franco-Arcilloso	36	22
Franco-Arcillo-Limoso	38	22
Arcillo-Limoso	41	27
Arcilla	42	30

Para testar que los porcentajes de humedad asociados al punto de saturación, la capacidad de campo y al punto de marchitez permanente son los adecuados para un determinado suelo, es recomendable la utilización de tensiómetros. Podemos encontrar infinidad de autores que relacionan la tensión obtenida con los niveles de agua en el suelo según Fuentes (1991) la interpretación de las lecturas obtenidas en el tensiómetro es la siguiente:

- De 0 a 10 kPa: Indica que el suelo está saturado, producto de riegos profundos o de fuertes precipitaciones.
- De 10 a 20 kPa: Indica que el suelo está a la capacidad de campo. Es la lectura que se debe mantener en riego por goteo.
- De 30 a 60 kPa: Humedad útil, pero escasa para el riego por goteo.
- Superior a 70 kPa: Las plantas no disponen de agua necesaria para su crecimiento.

También se disponen de tablas que relacionan las diferentes texturas del suelo con la tensión asociada a los parámetros más importantes del contenido de agua en el suelo. Gracias a esta bibliografía y al uso de tensiómetros podremos establecer curvas características relacionando los valores de la tensión con los porcentajes de humedad en el suelo.

Tabla 2: Valores de la curva de humedad asociados a la tensión del suelo (Adaptada del Centro de Tecnología de riego de la Universidad de Fresno)

Textura		Capacidad de campo	P. de inflexión de la curva de riego
		cbar = kPa	cbar = kPa
Arena	Min	9	20
	Máx	10	25
Arenoso-franco	Min	10	25
	Máx	11	30
Franco-arenoso	Min	10	22
	Máx	11	27
Franco-arcillo-arenoso	Min	11	27
	Máx	12	32
Franco	Min	11	25
	Máx	12	30
Arcillo-arenoso	Min	12	30
	Máx	13	35
Franco-limoso	Min	13	35
	Máx	14	40
Limo	Min	13	40
	Máx	14	45
Franco-arcilloso	Min	14	45
	Máx	15	50
Franco-arcillo-limoso	Min	13	40
	Máx	14	50
Arcillo-limoso	Min	12	38
	Máx	14	42
Arcilla	Min	14	55
	Máx	15	60

Para obtener el valor de la saturación de un suelo se procede a aplicar un riego prolongado, analizando mediante el software que los sensores crean una curva exponencial a medida que el agua va penetrando en el firme. Cuando observamos que la curva que representa los sensores de humedad se estabiliza, significará que el estrato donde se ha situado el sensor a alcanzado su capacidad máxima capacidad de retención y se asocia a un porcentaje de humedad. En este instante se debe realizar una medición con el tensiómetro en la zona húmeda del bulbo, esperando obtener valores entre 0-10 kPa, ya que el suelo estará prácticamente saturado debido a que con un riego prolongado el agua ocupará todos los macroporos del suelo.



Figura 3: Variación del contenido de humedad en el suelo a 40 cm de profundidad.

En los días siguientes se vuelve a repetir la medición, donde parte del agua del horizonte habrá desaparecido por la fuerza de la gravedad, y encontraremos el agua que el suelo es capaz de retener, esta será nuestra capacidad de campo, que aproximadamente debe encontrarse sobre los 33 kPa en suelos francos (Richards y Weaver, 1944). El drenaje se considera despreciable en 48 horas, oscilando entre 24 horas en suelos arenosos y 72 horas en suelos arcillosos. En cuanto al valor del agotamiento permisible dependerá en gran medida de la textura del suelo y estado fenológico del cultivo que marcaran las necesidades hídricas, por tanto, la duración del porcentaje humedad en el suelo (Starr y Paltineanu, 1998 a y b).

En consecuencia, el conjunto de la información obtenida a través de publicaciones científicas, la utilización de tensiómetros y los análisis de suelo en laboratorio pueden ayudar a determinar la de capacidad de campo y el nivel de agotamiento permisible. Estos niveles deben de ser corroborados con visitas periódicas al campo y con la interpretación de las curvas de humedad observadas en el software. Si asociamos estos términos a porcentajes de humedad podremos crear una dinámica de riego muy interesante para el manejo hídrico de los cultivos, una herramienta que gracias al almacenamiento de datos de forma constante nos permitirá el análisis de forma continua del estado de la humedad de suelos estudiados. Nuestro objetivo al aplicar un riego estará próximo a la capacidad de campo.

1.4 Objetivos

El objetivo del trabajo es la comparación de los resultados obtenidos mediante la programación del riego basada en las necesidades hídricas de un cultivo (FAO 56) frente a los obtenidos con la programación del riego mediante la utilización de sondas de humedad del suelo con sensores capacitivos del tipo FDR (*Frequency Domain Reflectometry*). Para el estudio se instala un punto con 3 sensores a diferentes profundidades en una plantación comercial de cerezos en el Alto Vinalopó, y se registran los datos de manera continua para su análisis e interpretación.

La razón del estudio es la evaluación de metodología novedosa como técnica de mejora en el uso de los recursos hídricos, que permita recopilar más información sobre el comportamiento del agua en el suelo con el fin de mejorar la productividad de los cultivos.

2 MATERIAL Y MÉTODOS

Para realizar el estudio del manejo del agua, se utilizaron sensores capacitivos del tipo FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) para obtener el contenido de agua en el suelo a partir de variaciones en la constante dieléctrica del suelo. Las sondas se colocaron a diferentes profundidades, conectados a un registro de datos (*datalogger*) que recopilan la información del contenido de humedad en el suelo y envían los datos mediante una señal de telefonía móvil para que puedan ser analizados de forma remota. Los datos recogidos por los sensores se envían al minuto, expresados en contenido volumétrico de agua en suelo (m^3 agua/ m^3 de suelo) de esta forma se puede conocer el estado hídrico del suelo de una manera continua mediante el software adecuado.



Figura 4: Detalle de un registrador de datos (*datalogger*)

Además, al *datalogger* se conectó un contador, instalado en el ramal portagotos, que nos permite contabilizar los litros que circulan por la tubería hasta el final del ramal. De este modo podemos hacer una extrapolación para conocer los metros cúbicos gastados por hectárea en cada riego. Gracias a que el caudalímetro registraba los datos, podemos observar mediante el software, variaciones en los niveles de humedad en el suelo en relación al flujo de agua real del emisor en este punto de monitoreo.

Para la instalación los sensores se realizó una zanja con unas dimensiones aproximadas de 0,4 x 0,4 x 1 m, intentando alterar lo menos posible el perfil del suelo y evitando la destrucción de raíces activas. A continuación, el hoyo se recubrió cuidadosamente, respetando los horizontes y recompactando la tierra, para evitar burbujas de aire. En nuestro estudio situamos 3 sondas a diferentes profundidades; a 20, 40 y 60 cm de profundidad considerando la zona entre 20 y 40 la más interesante para el desarrollo radicular del cerezo, a partir de 60 cm el agua ya no es aprovechable para las raíces. Por lo tanto, deberemos evitar en la medida de lo posible que la sonda de 60 cm fluctúe con la aplicación de un riego, ya que esto significará que estamos perdiendo el agua por percolación. La fluctuación de esta sonda más profunda será interesante para aplicar riegos de lavado.

Las primeras semanas del estudio se evaluó la dinámica de riego que aplicaba el agricultor, sin realizar ninguna alteración en el riego. Mediante la utilización de un tensiómetro a 40 cm de profundidad, zona de mayor repercusión para el desarrollo de las raíces, se aplicó la metodología de la programación de riego mediante sensores de humedad anteriormente desarrollada.



Figura 5: Detalle de la instalación de los sensores FDR a diferentes profundidades.

Se tomaron medidas entre las diferentes etapas que abarca un intervalo de riego, para establecer los valores del punto de saturación, capacidad de campo y nivel de agotamiento permisible. Estas medidas se anotaron junto a los contenidos de humedad correspondientes observados en el software. Creando una relación entre los valores de tensión y contenido de humedad en el suelo. La representación de esta relación se traduce como la curva de retención de agua de suelo estudiado y es una información añadida para la determinación de los parámetros objetivo del riego.

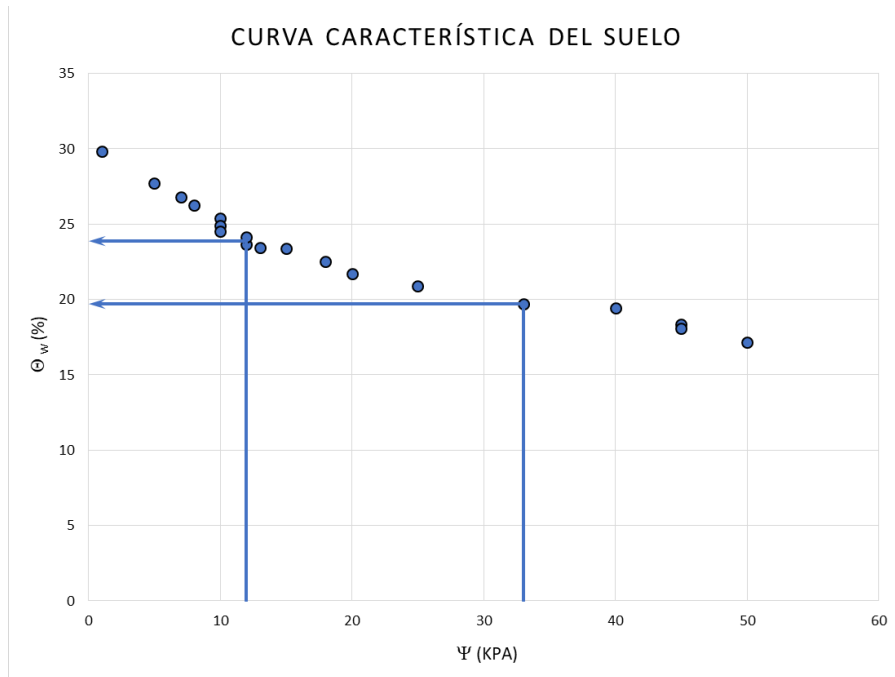


Figura 6: Curva característica del suelo de la parcela estudiada. Se señalan los límites de capacidad de campo, CC, y límite del agua fácilmente utilizable, AFU.

Para obtener datos complementarios a los sensores, se utilizó un lisímetro de succión situado a 30 cm de profundidad; una tecnología económica basada en un método simple que puede aportar mucha información sobre la fertirrigación. Un lisímetro de succión está compuesto por tubos de plástico sellados, equipados en el extremo inferior con una punta cerámica. Su funcionamiento se basa en una línea de succión desde el extremo inferior hasta más allá del sello superior, donde mediante una bomba de succión se realiza un vacío hasta el manómetro indique unos 70 kPa. Gracias al vacío creado, la solución presente en el suelo será absorbida por la punta cerámica. El tiempo para extraer una muestra de disolución vendrá condicionada por el nivel de humedad circundante al lisímetro y por las características del suelo. La actividad del lisímetro trata de imitar la fuerza que las raíces de un árbol realizan para obtener el agua en suelo.

Las extracciones de las disoluciones de los lisímetros solo se realizaron en los meses más importantes para el desarrollo del cultivo del cerezo (marzo-julio); de las disoluciones se analizaron los nutrientes más elementales mediante la utilización de tiras reactivas y mediante la utilización de medidores portátiles digitales; el pH, la conductividad eléctrica y el potencial redox. Destacando este último por aportar información sobre la aireación el sistema edáfico, condicionando la actividad microbiana y el tipo de reacciones que acaecen en él. A mayor potencial redox obtenido en la disolución, mayor contenido de oxígeno en el suelo. El potencial redox puede ser un buen parámetro indicativo de drenaje de los suelos, indicando problemas de exceso de agua en el suelo. La aireación del suelo es necesaria, ya que la limitación de oxígeno origina numerosos cambios físicos, químicos y biológicos en el suelo, entre los que cabe destacar: la producción de sustancias tóxicas (Pardos, 2004).

Todos los métodos y procesos aplicados al estudio fueron aprobados por el propietario de la explotación, recayendo en él, la toma de decisiones en cuanto a riego y fertilización se refiere.

2.1 Descripción de la parcela objeto de estudio

El estudio realizado tiene una duración de 12 meses, comenzó en julio de 2016, instalando los sensores en una plantación adulta de cerezos (*Prunus avium* L.) en termino de Cañada, Alicante.

La parcela tiene una superficie de 1 hectárea, con una altitud de 545 m sobre el nivel del mar, sigue un marco de plantación de 5 m x 3,5 m y está constituida por diversas variedades de cerezo: “Satin”, “Rocket (SMS-22)”, “Frisco”, “Santina (13S-5-22)”, “Prime Giant”, situando los sensores en la variedad “SP106”. Todas están injertadas en campo sobre Marilan (Mariana-Adara) un pie combinado de ciruelo (*Prunus cerasifera*). El sistema de riego empleado se basa en una única línea portagoteros con 4 goteros autocompensantes por árbol, con un caudal emisor de 4L/árbol.

El suelo de la finca puede considerarse de textura Franco-limosa, según la clasificación Soil Survey Staff Division (U.S.D.A.), presenta un pH moderadamente básico (8,3) y su contenido en materia orgánica es bajo (0,75%). Destaca por ser un suelo muy calcáreo, con altos contenido de carbonato cálcico (CaCO_3) (30%).

El agua de riego procede de embalses propios de la Comunidad de Regantes San Cristóbal con sede en Benejama adherida en la CGUAV (Comunidad de Regantes del Alto Vinalopó). El agua está caracterizada por tener una baja conductividad eléctrica ($\text{CE} \approx 1 \text{ dS/m}$) y un bajo contenido en carbonato sódico residual.

Para obtener los datos meteorológicos que definan la climatología de la parcela del estudio, se ha realizado una media anual de los valores agronómicos más importantes de las dos estaciones meteorológicas más cercanas a la plantación; Villena y Campo de Mirra ambas pertenecientes al IVIA (Instituto Valenciano de Investigaciones Agraria).

Tabla 3: Datos meteorológicos característicos de la parcela de estudio

Datos meteorológicos de las estaciones de Villena y Campo de Mirra (2000-2016)	
T ^a media	14,73 °C
Humedad Relativa media	65,61 %
Precipitación	326,42 mm
Evapotranspiración	1273,07 mm
Horas frio	1536,95 h

2.2 Datos de los sensores de humedad del suelo

Los datos obtenidos por los sensores de humedad fueron tomados minuto a minuto mediante un registro de datos (*datalogger*), estos datos se pueden observar de forma remota en cualquier PC. El software nos muestra en forma de grafica las fluctuaciones de la humedad de los diferentes sensores, relacionando el contenido volumétrico de agua en el suelo (%VWC) con una variable temporal.

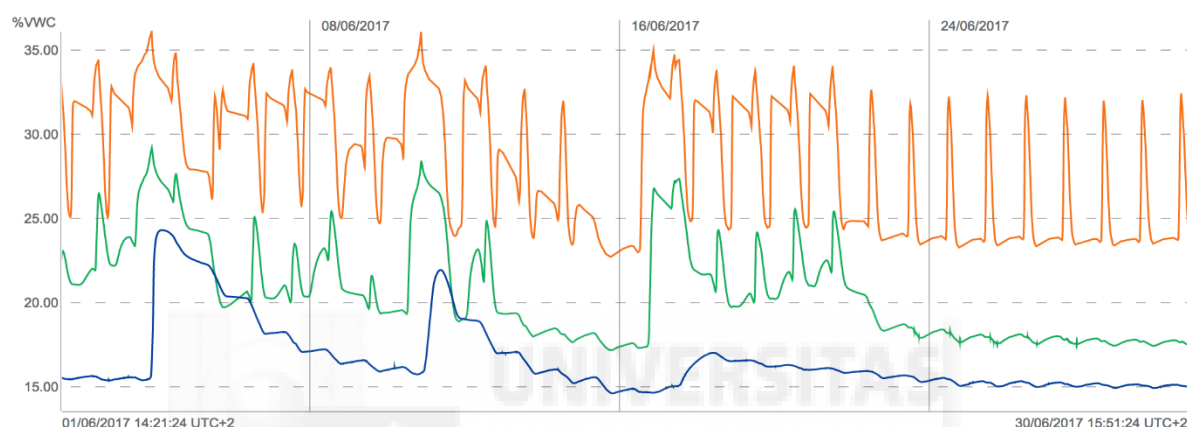


Figura 7: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de junio de 2017.

La aplicación nos permite ampliar o reducir la escala temporal para observar la tendencia de riego que se está realizando y conocer el nivel de humedad de las diferentes sondas en un determinado instante.

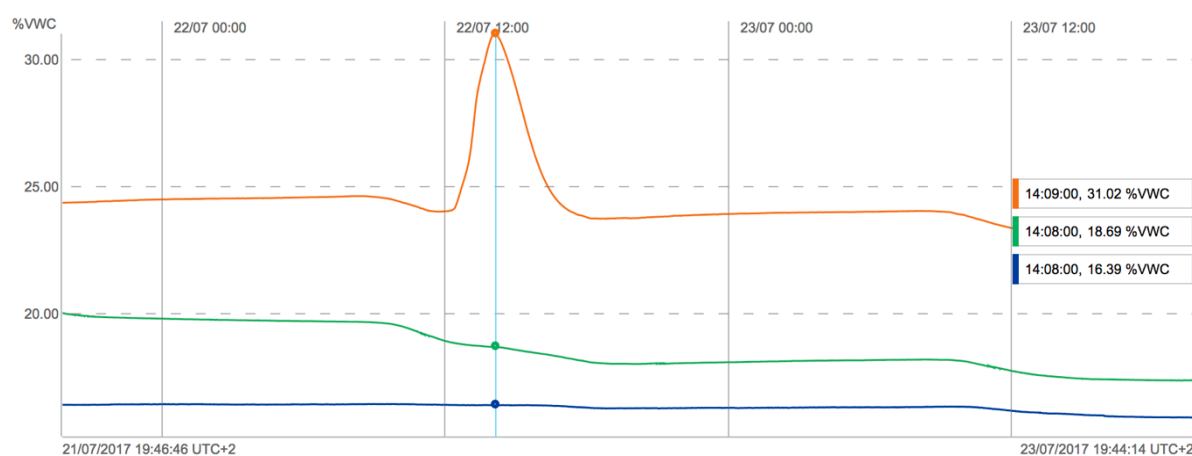


Figura 8: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) el 22 de julio de 2017 a las 12:00 horas

Gracias a que el caudalímetro está conectado al registro de datos, en la aplicación también podemos observar los pulsos de agua de cada riego y correlacionarlo con la variación de los niveles de humedad que experimentan los sensores del punto de monitorización.

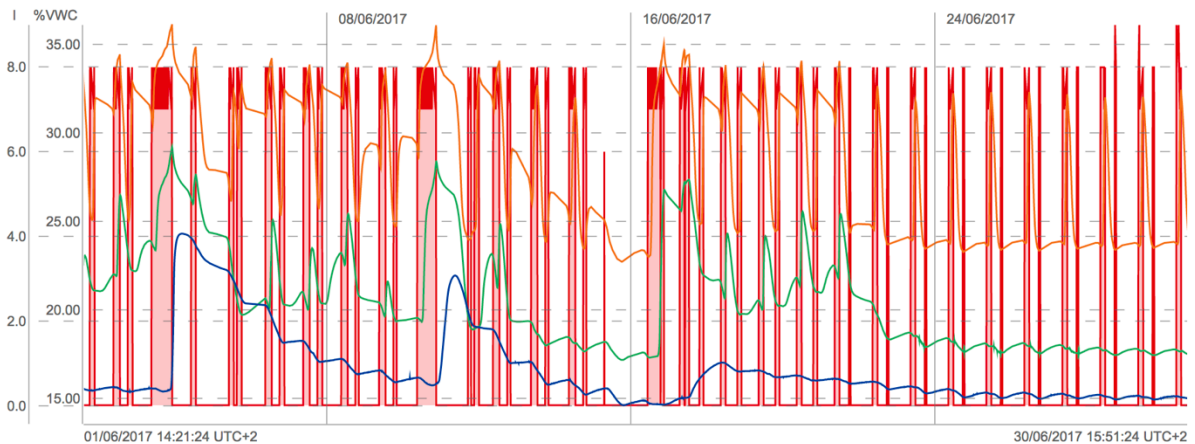


Figura 9: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de junio de 2017.

Conociendo los litros que circulan en cada riego por el punto de monitorización y caracterizando el marco de plantación y sistema de riego de la parcela podremos realizar una extrapolación, obteniendo el consumo por hectárea de cada uno de nuestros riegos.

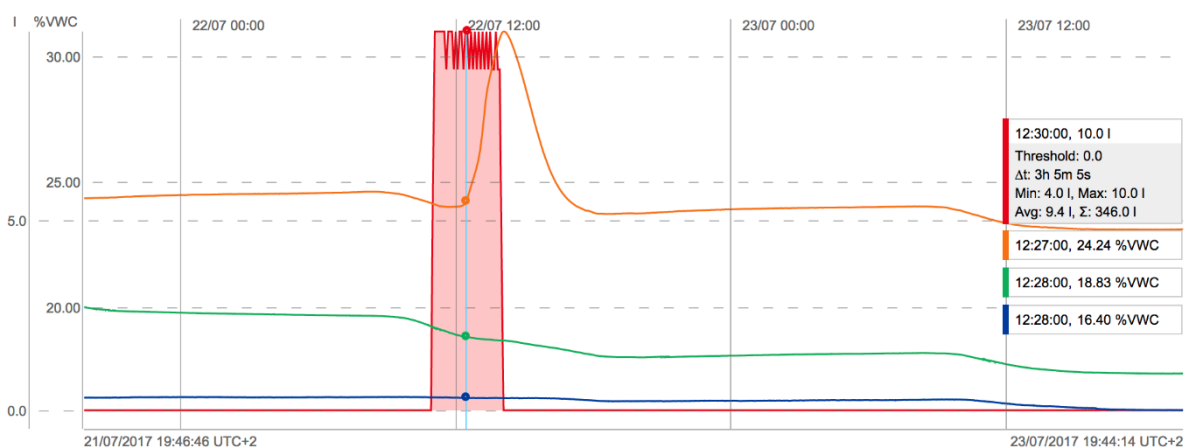


Figura 10: Detalle de la información aportada por el software, relativa a los sensores de humedad en contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) y a la información sobre el caudal aportado en un determinado riego.

De este modo elaboramos graficas mensuales del consumo por hectárea de nuestra parcela que nos aportan información sobre el número de riegos al día y del caudal de cada uno de ellos. Como ejemplo de esta explicación se exponen los resultados obtenidos en el mes de junio de 2017, representado los valores diarios del riego en mm por hectárea, las series de datos de diferente color indican la aplicación de varios riegos diarios.

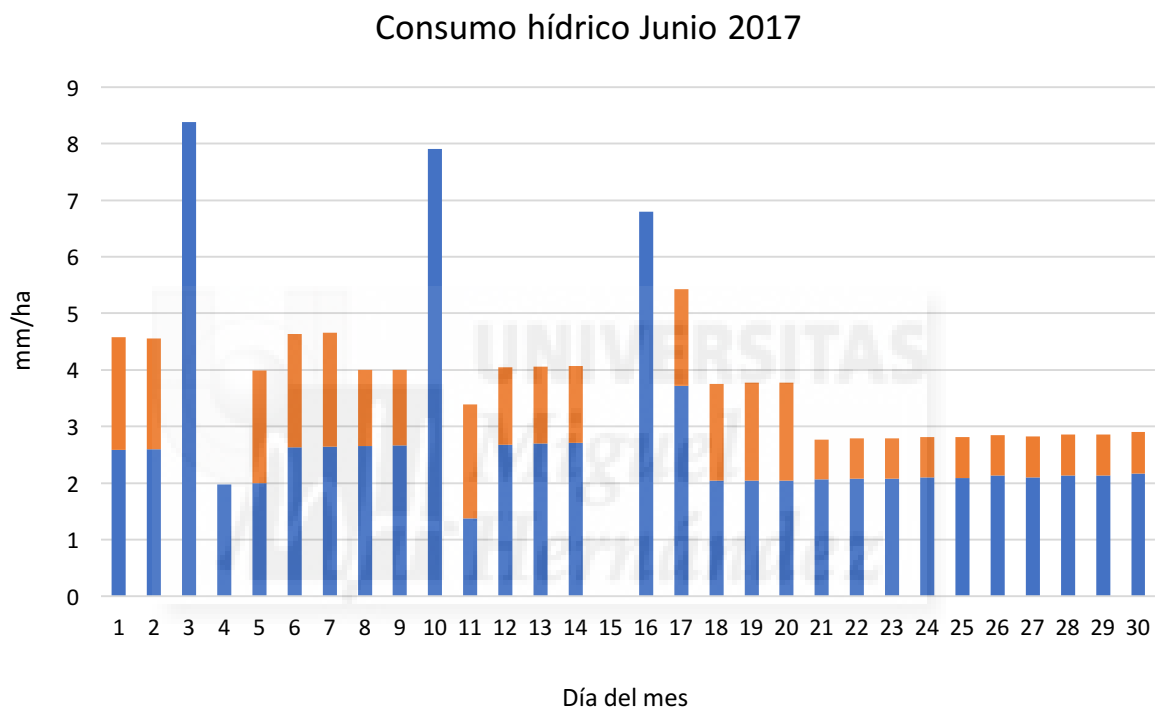


Figura 11: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de junio de 2017

Tabla 4: Resumen del consumo hídrico del mes de junio de 2017.

Nº de riegos en el mes de junio de 2017	54
Consumo hídrico total del mes de junio de 2017 (mm/ha)	116,06

Se adjuntan en los Anexos; la información a modo de gráfica de variación del contenido volumétrico de agua del suelo de los sensores y de consumo hídrico mensual.

2.3 Datos agrometeorológicos

Debido a que la parcela está situada a caballo entre las estaciones meteorológicas de Villena y Campo de Mirra ambas pertenecientes al IVIA, se ha obtenido la media de los valores diarios de la precipitación total (P_T) y de la evapotranspiración de referencia (ET_0). Los valores están agrupados por meses y presentan en las siguientes tablas:



Tabla 5: Evapotranspiración de referencia (ET_o) diaria durante el año 2016-2017.

Evapotranspiración de referencia (ET _o) (mm)												
Día	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
1	6,845	6,265	4,74	3,32	1,69	0,785	0,78	1,42	2,165	4,28	4,585	5,765
2	7,23	6,085	5,25	3,785	2,27	0,78	0,63	0,85	2,695	3,98	4,65	6,44
3	7,11	6,615	5,89	3,82	2,015	0,78	1,24	1,46	2,19	3,73	4,9	6,13
4	6,525	6,98	6,425	3,565	1,64	0,68	1,105	1,595	1,41	3,73	5,04	4,14
5	7,02	6,42	6,415	3,075	1,985	0,645	1,045	2,7	1,75	3,39	4,015	5,835
6	7,035	5,54	6,185	3,85	1,9	0,755	0,685	2,63	2,49	3,83	5,47	6,32
7	3,7	5,635	5,405	3,605	1,52	0,925	0,63	2,15	3,4	3,69	5,56	6,16
8	6,775	6,23	5,255	3,55	2,08	0,66	0,93	2,9	2,965	3,825	5,88	6,205
9	7,505	6,155	5	2,55	1,66	0,81	0,91	1,96	3,465	3,74	6,07	5,925
10	6,885	2,61	4,78	2,79	1,635	0,765	1,17	1,27	4,14	3,86	4,455	6,245
11	7,435	4,68	4,565	3,335	1,82	0,795	1,205	1,715	4,005	4,93	3,915	6,94
12	7,75	4,87	4,77	1,895	1,54	0,87	1,205	1,965	3,655	4,635	4,39	6,89
13	4,97	5,47	4,235	1,22	1,65	0,645	1,63	1,685	0,91	4,995	4,66	7,09
14	4,205	5,62	3,735	2,28	1,64	0,68	1,56	1,75	2,205	4,92	5,61	7,14
15	4,44	5,325	3,585	2,585	1,425	0,585	1,515	1,665	2,985	5,31	5,605	8,055
16	5,82	1,855	4,23	2,64	1,5	0,73	1,855	1,6	3,14	3,865	5,05	7,515
17	6,315	5,975	4,07	2,905	1,625	0,88	1,155	1,405	2,695	4,64	5,725	7,055
18	6,21	6,44	4,065	1,35	1,525	0,87	1,1	1,825	3,255	4,63	4,69	7,22
19	6,105	6,045	4,45	1,225	1,44	0,62	0,815	1,83	3,575	1,745	4,94	6,565
20	5,215	6,95	3,025	1,145	1,41	0,905	0,395	2,085	3,185	3,335	5,575	6,605
21	6,54	4,225	4,455	1,105	1,365	0,885	0,765	2,04	3,415	3,94	4,475	7,025
22	6,52	5,255	4,245	1,575	0,745	0,99	1,205	2,08	3,525	3,675	6,825	7,415
23	6,02	5,79	4,025	2,25	0,67	0,995	0,91	2,325	2,76	4,68	6,295	8,08
24	6,095	5,85	3,69	2,19	0,895	0,855	0,96	1,085	2,14	4,605	6,08	7,97
25	6,51	5,485	3,545	1,18	0,98	0,88	1,275	2,24	3,075	3,595	6,185	6,86
26	6,76	5,16	2,89	2,165	0,91	1,275	1,15	2,12	3,525	4,09	6,265	7,95
27	6,75	5,695	2,765	2,13	0,92	0,93	0,935	2,165	3,06	1,18	5,945	6,725
28	6,295	5,99	2,495	1,67	0,755	0,545	1,72	2,735	3,015	1,195	5,86	8,49
29	6,59	6,205	2,245	2,105	0,635	0,855	0,96	0	3,75	1,765	5,64	7,52
30	6,89	5,035	2,72	2,39	0,86	0,56	1,35	0	3,59	4,305	4,135	6,57
31	5,77	4,915	0	1,625	0	0	1,35	0	3,875	0	5,365	0

Tabla 6: Precipitación total (P_T) diaria durante el año 2016-2017

Precipitación Total (P_T) (mm)												
Días	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
1	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0,2	0,1	0,2	1,21	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	6,91	0	0	0
4	0	0	0	0	0	14,515	0	0	2,005	0	0	4,705
5	0	0	0	0,1	1,805	9,84	0,1	1,815	0,1	0	0	0,2
6	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0,2	0	0,3	0,2	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0
10	0	3,01	0	0,1	0	0	0,405	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0,1	0	0,2	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	1,5	0	0,3	0	0	12,245	0	0	0
13	0	0	4,33	4,21	0	0,1	0	2,61	49,59	0	0	0
14	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,2	0	0	0
15	0	0	0	0	0,2	0,405	0	0,1	0	0	0	0
16	0	5,925	0	0	0	6,99	0	0,1	0	0	0	0
17	0	0	0	0,2	0	16,37	0	0,1	0	0	0	0
18	0	0	0	0,805	0	18,31	0	0,1	0	0	0,405	0
19	0	0	0	8,92	0	42,985	32,685	0	0,1	0	0,1	0
20	0	0	0	4,945	0,3	0	12,475	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0,1	3,715	0	22,905	0	0	0	0	0
22	0	0	0,1	0	14,86	0	2,42	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0,2	12,545	0,1	0,305	1,915	1,405	0	0	0
24	0	0	0	1,31	0	0,1	0	0,705	0	0	0	0
25	0	0	0	1,1	0,1	0,1	0	0	0,1	0,2	0	0
26	0	0	1,8	0	0,5	0,1	0	0,3	0,1	0	0	0,705
27	0	0	1,395	0,1	12,635	0,1	4,625	0,2	0,605	5,215	0	0
28	0	0	4,33	1,095	0,2	0,1	0	0	0	2,91	0	0
29	0	0	7,62	0,3	1,705	0,1	0	0	0,2	0,1	0	0
30	0	0	0,2	0	1	0,1	0	0	0	0	3,58	0
31	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0		0,1	0

2.4 Cálculo de los requerimientos hídricos del cultivo mediante balance de agua

El cálculo de la programación de riegos mediante balance de agua, necesita de gran cantidad de información, aunque sus cálculos sean sencillos. Por ello tratando los datos agrometeorológicos obtenidos anteriormente mediante hojas de cálculo se puede utilizar el CROPWAT, programa creado por la FAO para el cálculo de las necesidades de riego. El programa posee en su base de datos los coeficientes de los cultivos de referencia permitiendo así el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Para el cultivo del cerezo hemos considerado una duración de cultivo aproximada de 8 meses, iniciando los requerimientos hídricos a mediados del mes de marzo. Según los coeficientes de cultivo en la zona mediterránea las etapas del cultivo del cerezo son las siguientes:

Tabla 7: Duración de las etapas del cultivo del cerezo

Etapas del cultivo				
Inicial	Desarrollo del cultivo	Mediados de temporada	Final de temporada	Total
30	50	130	30	240

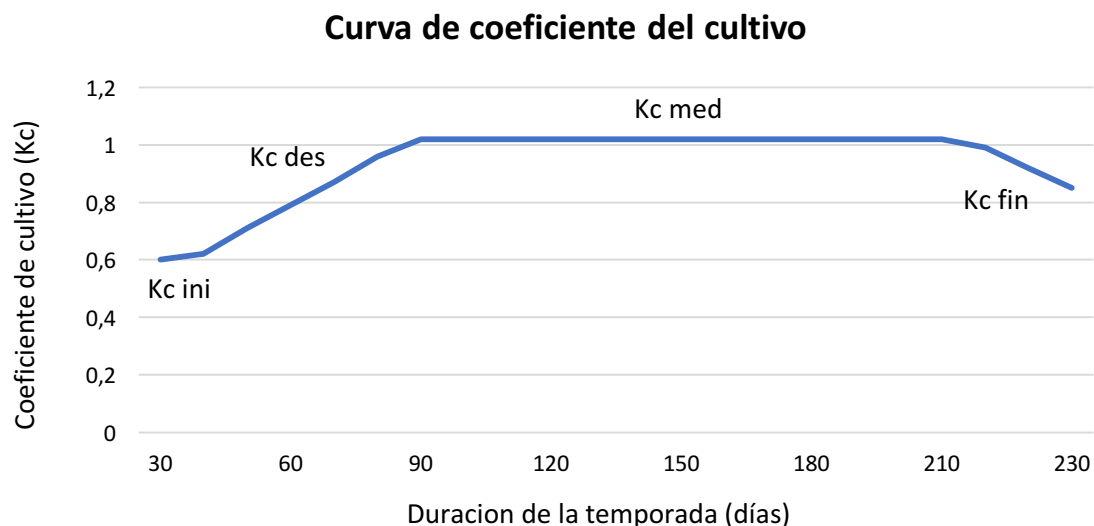


Figura 12: Curva del coeficiente del cultivo del cerezo en relación a la duración de la temporada.

El CROPWAT es capaz de calcular la fracción de la lluvia que es aprovechada por las plantas denominada precipitación efectiva (P_e), además nos permite la opción de introducir las características texturales de nuestro suelo para mejorar en la exactitud los los datos que vayamos a calcular. Introduciendo todos los datos meteorológicos y rellenado todos campos que caracterizan el cultivo del cerezo de nuestro estudio, el programa calcula los requerimientos de agua necesarios. Se considera como el inicio de la temporada del cerezo el día el 15 de marzo aproximadamente, comenzando la diferenciación de yemas, la recolección en la comarca del Alto Vinalopó se produce a mediados del mes de junio, pero los riegos deben de mantener para paliar la elevada transpiración que se produce durante el verano a causa de las altas temperaturas, además los árboles se deben nutrir de reservas para la siguiente campaña.

El programa CROPWAT de FAO, aplicando la metodología del balance hídrico proporciona los requerimientos de riego expresados en decenas (días) que se producen a lo largo de la temporada del cultivo en mm.

2.5 Extracciones de las sondas de succión.

Como datos complementarios a los datos de humedad en el suelo, consumos y requerimientos hídricos, podemos encontrar la información aportada por las extracciones de los lisímetros o sondas de succión, se realizaron un total de 9 extracciones de forma puntual entre los meses de marzo y agosto. Esta información de fertirrigación se puede dividir en dos fracciones una más enfocada a la nutrición de las plantas como son la concentración de nutrientes en la disolución del agua del suelo y otra relevante a las características fisicoquímicas. Debido a que fertilización no es relevante en este estudio los datos sobre las concentraciones de nutrientes existentes en la disolución del agua del suelo se adjuntan en los anexos, los valores obtenidos son aproximados debido a que la utilización de tiras reactivas no es un método que destaque por su exactitud.

Las características de físico-químicas del suelo sí que pueden aportar información interesante que pueda variar la dinámica de riegos. Las mediciones se realizaron realizadas con los medidores portátiles aportaban información sobre 3 parámetros: pH, conductividad y potencial redox.

Tabla 8: Resultado de la conductividad eléctrica, pH y potencial redox obtenidos en las extracciones del lisímetro situado a 30 cm de profundidad.

Extracción Lisímetro (30 cm)			
Fecha	CE (dS/m)	pH	REDOX (mV)
1/3/16	0,8	6,7	305
10/3/16	0,9	6,8	311
6/4/16	1	6,5	270
21/4/16	1	6,6	155
3/5/16	1,1	6,7	134
18/5/16	1,3	7,3	125
7/6/16	2,7	7,6	315
6/7/16	2,5	7,6	104
24/8/16	2	7,8	92

Estos parámetros físico-químicos son el resultado de las aplicaciones del conjunto de la fertirrigación; son un indicador que aporta información sobre el sistema edáfico al agricultor. El aumento de la conductividad eléctrica se debe a la acumulación de sales o nutrientes en el horizonte básico estudiado, la acidificación del pH en las primeras etapas del cultivo se debe al uso de abonos combinados con la limpieza de los ramales portagoteros, mantienen altos durante toda la campaña, indicativo de que el suelo está bien oxigenado.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados obtenidos

El agricultor mediante los valores de referencia aportados con los sensores de humedad (punto de saturación, capacidad de campo y nivel de agotamiento permisible) y el conjunto de información complementaria (experiencia en el cultivo, estado de los árboles y fertirrigación) ha realizado la programación de riegos durante la campaña 2016-2017. Los datos del consumo hídrico se han agrupado en meses, con el fin de comparar metodologías y conocer el consumo total de la temporada:

Tabla 9: Consumo mensual de agua (mm/ha) en la campaña 2016-2017

Consumo mensual de agua (mm/ha)	
Julio	50,68
Agosto	62,58
Septiembre	41,85
Octubre	41,85
Noviembre	3,73
Diciembre	0
Enero	0
Febrero	4,02
Marzo	13,03
Abril	30,22
Mayo	85,12
Junio	116,05
Consumo Total 2016/2017	449,16

Consumo 2016-2017

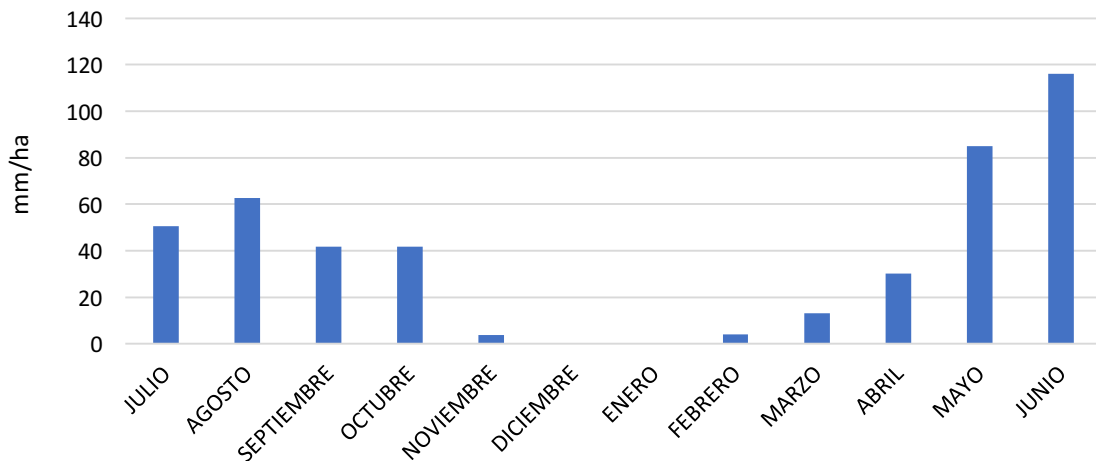


Figura 13: Consumo mensual (mm/ha) del estudio 2016-2017

El consumo total de la plantación de cerezos durante el estudio es aproximadamente de 500 mm/ha al año; durante los meses finales de otoño (noviembre) y los meses de invierno, de diciembre a mediados de marzo, las aportaciones de agua al cultivo son prácticamente nulas, debido a que los cerezos se encuentran en estado de latencia acumulando horas de frío y el riego de mantenimiento se cubre con el agua proveniente de las precipitaciones.

Tabla 10: Precipitación mensual año 2016-2017

Precipitación mensual 2016-2017 (mm)											
Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
0,1	8,93	19,87	25,48	49,96	111,82	77,02	9,45	73,56	8,42	4,185	5,61

El año 2016-2017 fue un año superior a la media en cuanto a la precipitación se refiere, destacando las nevadas y fuertes precipitaciones acaecidas en los meses de diciembre y enero.

El consumo principal de agua de riego coincide con la temporada del cerezo de mayo a octubre, destacando los meses de mayo y julio que representan el 19% y el 26% respectivamente del consumo total.

Tabla 11: Resultados del balance hídrico mediante el programa CROPWAT de FAO.

Mes	Decenas (días)	Etapa del cultivo	Kc (coeficiente)	ETc (mm/dec)	Prec. Efec (mm/dec)	Req. Riego (mm/dec)
Marzo	2	Inicial	0,6	11,3	26,2	0
Marzo	3	Inicial	0,6	21,4	2,4	19,1
Abril	1	Inicial	0,6	22,8	0	22,8
Abril	2	Desarrollo	0,62	26,7	0	26,7
Abril	3	Desarrollo	0,71	23,1	8,1	15,1
Mayo	1	Desarrollo	0,79	40,1	0	40,1
Mayo	2	Desarrollo	0,87	43,9	0,5	43,4
Mayo	3	Desarrollo	0,96	60,6	3,6	57
Junio	1	Media	1,02	60,4	4,8	55,6
Junio	2	Media	1,02	72,6	0	72,6
Junio	3	Media	1,02	76,2	0,7	75,5
Julio	1	Media	1,02	68,1	0	68,15
Julio	2	Media	1,02	59,8	0,1	59,7
Julio	3	Media	1,02	72,3	0	72,3
Agosto	1	Media	1,02	59,8	3	56,8
Agosto	2	Media	1,02	54,4	5,8	48,6
Agosto	3	Media	1,02	60,9	0	60,9
Septiembre	1	Media	1,02	56,6	0	56,6
Septiembre	2	Media	1,02	41,6	4,3	37,3
Septiembre	3	Media	1,02	33,8	14,3	19,5
Octubre	1	Media	1,02	34,7	0,5	34,2
Octubre	2	Final	0,99	20,3	18,7	1,6
Octubre	3	Final	0,99	18,6	4,1	14,5
Noviembre	1	Final	0,99	14,2	1,9	12,2

En lo referente a los requerimientos del cultivo obtenidos mediante el CROPWAT de FAO, los valores expresados en decenas de días se han agrupado de forma mensual para una mejor comparación.

Tabla 12: Requerimientos hídricos mensual (mm/ha) en la campaña 2016-2017

Requerimiento hídrico mensual (mm/ha)	
Julio	200,15
Agosto	166,3
Septiembre	113,4
Octubre	50,3
Noviembre	12,2
Diciembre	0
Enero	0
Febrero	0
Marzo	119,1
Abril	64,4
Mayo	140,5
Junio	203,7
Requerimientos Totales 2016/2017	970,25

En el cálculo de los requerimientos hídricos del agua solo se consideran los meses de la campaña del cerezo es decir del 15 de marzo al 10 de noviembre, estos requerimientos están calculadas para un nivel máximo de agotamiento del contenido de agua en suelo del 50 %.



Figura 14: Requerimientos hídricos del cultivo (mm/ha) 2016-2017.

Los requerimientos hídricos del cultivo han sido calculados mediante el método del balance del agua, en consecuencia, las necesidades del cultivo guardan una estricta relación con las etapas de la temporada del cerezo definidas por los coeficientes de cultivo (kc). Como podemos observar en la gráfica las necesidades crecen exponencialmente hasta los meses de junio y julio donde alcanzan los valores máximos, para finalmente disminuir en los meses de final de temporada.

3.2 Comparación de sistemas de programación del riego

La programación del riego mediante la utilización de sondas de humedad recayó a cargo del agricultor de la parcela y se enfocó a realizar riegos con el objetivo de alcanzar la capacidad de campo del suelo, combinados con riegos más profundos para el lavado de sales. En cuanto al nivel de agotamiento permisible, fue consensuado un rango que no comprometiera a la disponibilidad de agua en el suelo, exceptuando momentos puntuales en los que el agricultor quería que el suelo se oxigenara o provocar pequeñas situaciones de estrés para frenar la actividad vegetativa de los árboles. Debido que el suelo del estudio tiene poca capacidad de retención de la humedad, el propietario de la explotación considero aplicar varios riegos al día con el objetivo de aportar nutrientes en forma líquida a los árboles.

La simulación del balance hídrico se realizó con el objetivo tener una referencia establecida y fiable sobre las necesidades teóricas de una plantación de cerezos en la zona mediterránea, utilizando metodología contrastada por la FAO.

Para el cálculo de los requerimientos hídricos del cultivo se empleó el programa CROPWAT (FAO) con los aspectos característicos de la plantación, fijando un agotamiento crítico del 50%.

A continuación, se contraponen los resultados obtenidos en el estudio mediante las distintas metodologías empleadas:

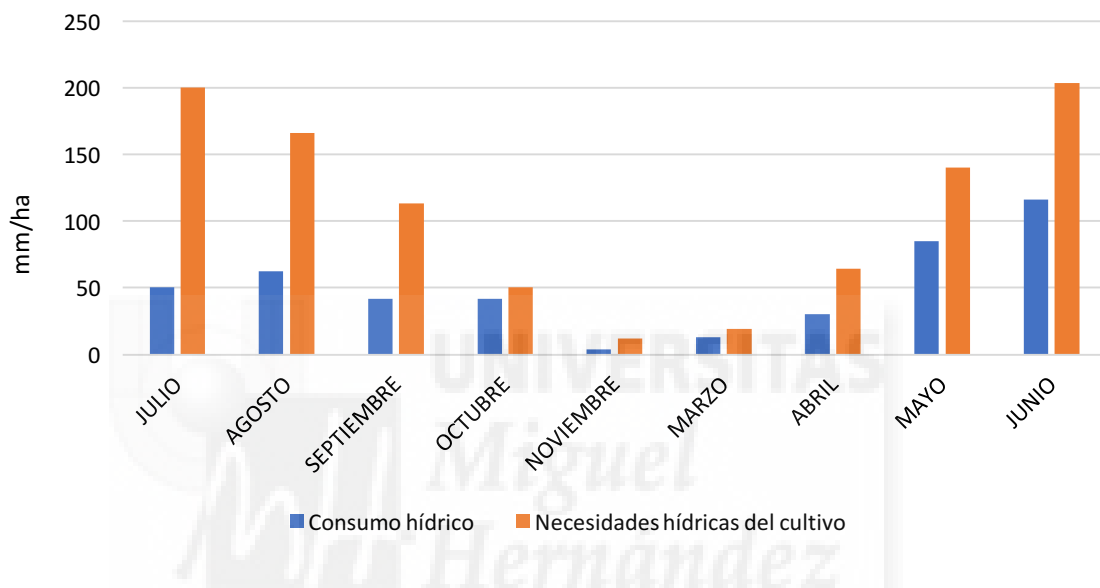


Figura 15: Comparativa entre el consumo hídrico obtenido mediante la programación del riego con sensores de humedad frente a las necesidades teóricas del cultivo calculadas con el método del balance hídrico.

Como se puede observar en este gráfico, la tendencia mensual de riego fue muy similar, observándose que las necesidades hídricas durante toda la temporada del cerezo son mayores que los aportes realizados por el agricultor mediante la programación del riego con sensores de humedad del tipo FDR (*Frequency Domain Reflectometry*).

En conclusión, se puede afirmar que el riego mediante la programación de sensores de humedad realizado en este estudio, durante el periodo que anual que abarca desde el 1 de julio de 2016 al 30 de junio de 2017, se han consumido 449,16 mm/ha en una plantación adulta de cerezas situada en Cañada (Alicante) en la comarca del Alto Vinalopó. Este consumo es menor en todo momento que el esperado mediante el cálculo del balance hídrico, obtenido con los datos agrometeorológicos de la zona estudiada y que comprende la duración de una temporada de cerezas en el ámbito mediterráneo. Las necesidades o requerimientos hídricos del cultivo de cerezas en base los datos estudiados establecen un consumo anual de 970,25 mm/ha, en consecuencia, se puede afirmar que mediante la programación del riego con sensores de humedad FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) se ha realizado un riego deficitario a lo largo del estudio, que se ha consumido un 46,3% de agua de riego menos de lo esperado.

4 CONCLUSIONES

Analizando la comparación de los sistemas de programación de riego, se concluye que el manejo del régimen hídrico mediante las sondas de humedad FDR (*Frequency Domain Reflectometry*), supone un déficit hídrico respecto a las necesidades que demanda un cultivo de cerezas en la zona mediterránea, según la metodología del balance hídrico. Considerando las condiciones experimentales descritas en el estudio, el déficit hídrico supone un 46,3% de la dotación de agua de riego esperada, sin producirse una pérdida del rendimiento asociada.

La utilización de múltiples sensores a distintas profundidades, combinado con el caudalímetro y el uso de los lisímetros en el punto de monitorización son una herramienta útil para obtener información de la respuesta del agua a través de los horizontes del agua. Como conclusión la programación del riego mediante sensores de humedad es más compleja y los valores obtenidos pueden ajustarse con mayor exactitud por parte del agricultor, pero aporta mayor información al agricultor sobre la respuesta del agua de riego en el suelo que la propuesta por la FAO basada en el balance de agua.

El déficit hídrico aplicado se ha repartido aproximadamente igual entre todos los meses sin tener en cuenta el estado fenológico del cultivo. Existe margen para aplicar estrategias de Riego Deficitario Controlado para reducir el riego en las fases en las que el cultivo es menos sensible al déficit y mejorar así la productividad del cultivo. Sería necesario el seguimiento del estudio para determinar un resultado más concluyente.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Allen R., Pereira L., Raes D. y Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Publicación número 56. Roma. FAO.
- Fuentes Yagüe, J.L. (1991). Características agronómicas del riego por goteo. Hojas divulgadoras. Núm. 17/90 HD. Servicio de Extensión Agraria. Ministerio de Agricultura de Pesca y Alimentación.
- Dane JH. y Toppe GC. (2002). Métodos de Análisis del Suelo Parte 4 Métodos Físicos, Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Navarro Caballero, M.T. (2010). Reutilización de aguas regeneradas: aspectos tecnológicos y jurídicos. Ed. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. (www.fao.org)
- Pardos J.A. (2004). Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. Investigaciones Agrarias: Sistema Recuperación Forestal. Fuera de serie, 101-107
- Richards L.A., and Weaver L.R. (1944). Moisture retention by some irrigated soils as related to soil-moisture tension. Journal of Agricultural Research, 69:215-235.

- Romero, P., Navarro, J.M., Pérez-Pérez, J.G., García-Sánchez, F., Gómez-Gómez, A., Porras, I., Martínez, V., Botía, P. (2006). Deficit irrigation and rootstock: their effects on water relations, vegetative development, yield, fruit quality and mineral nutrition of Clemenules mandarin. *Tree Physiology*, nº 26, pp. 1537–1548.
- Ruiz Sánchez, MC., Domingo, R., Castel, J.R. (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain: a review. *Spanish Journal Agricultural Research*, no 8(S2), pp. 5–20.
- Saxton KE. y Rawls W.J. (2006). Estimaciones características del agua del suelo por textura y materia orgánica para soluciones hidrológicas. *Soil Science Society of America Journal*. 70: 1569-1578.
- Starr J.L. and Paltineanu I.C. (1998 a) Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. *Soil and Tillage Research*. 47:43-49.
- Starr, J.L. and Paltineanu, I.C. (1998 b) Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Science Society of American Journal*. 62:115-122.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C., y Fernández, M.D. (2007). Establishing lower limits for on-farm irrigation management with volumetric soil water content sensors by using in-situ assessments of apparent crop water uptake. *Agricultural Water Management*, 92:13–28

- Zúñiga Espinosa, C.L. (2004). Manejo del riego mediante un monitoreo hídrico en tiempo real determinado con la técnica “Frequency Domain Reflectometry”. Director: Julio Haberland A. Tesis Doctoral. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Ingeniería. Santiago, Chile.



ANEXOS



Anexo 1: Gráficas de variación del contenido en humedad del suelo, riego aplicado y consumo hídrico diario

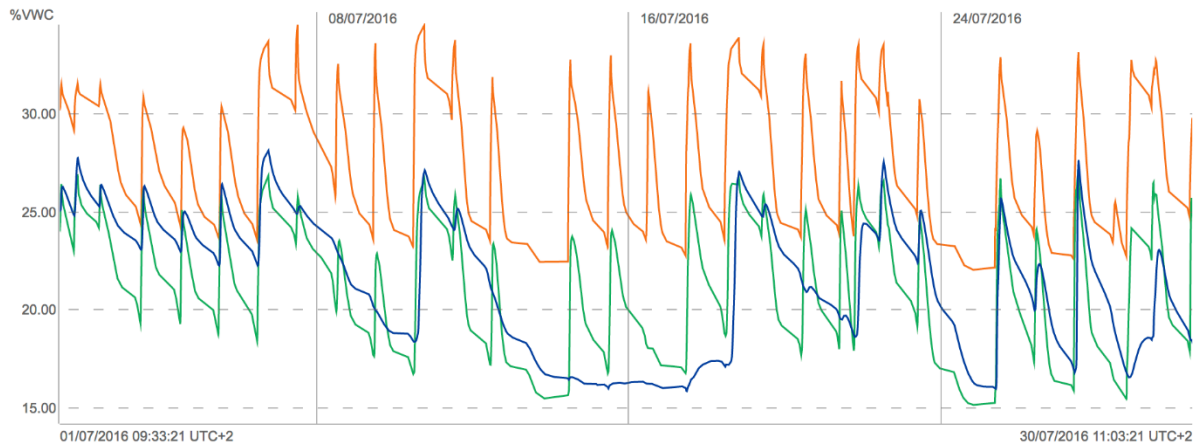


Figura A.1: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de julio de 2016.

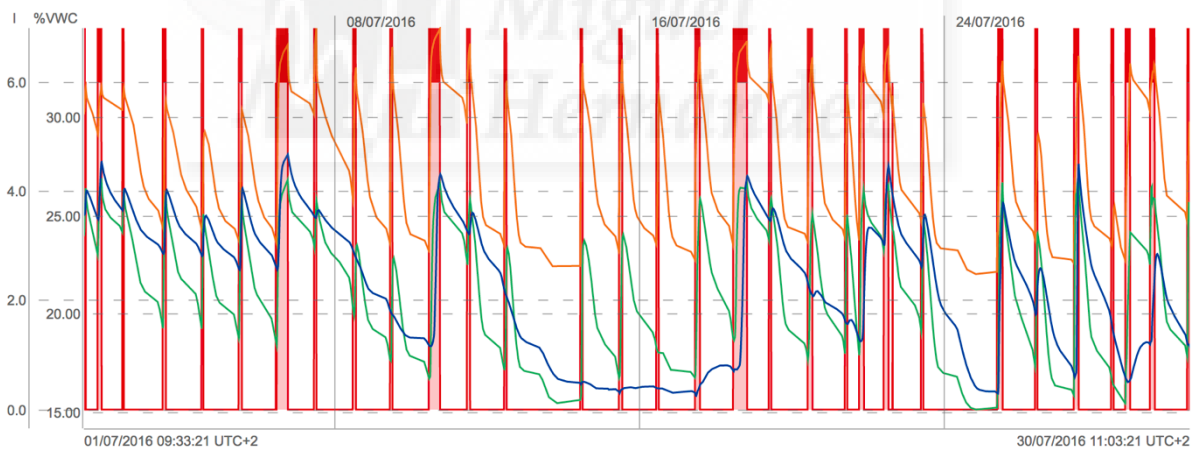


Figura A.2: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de julio de 2016.

Consumo hídrico Julio 2016

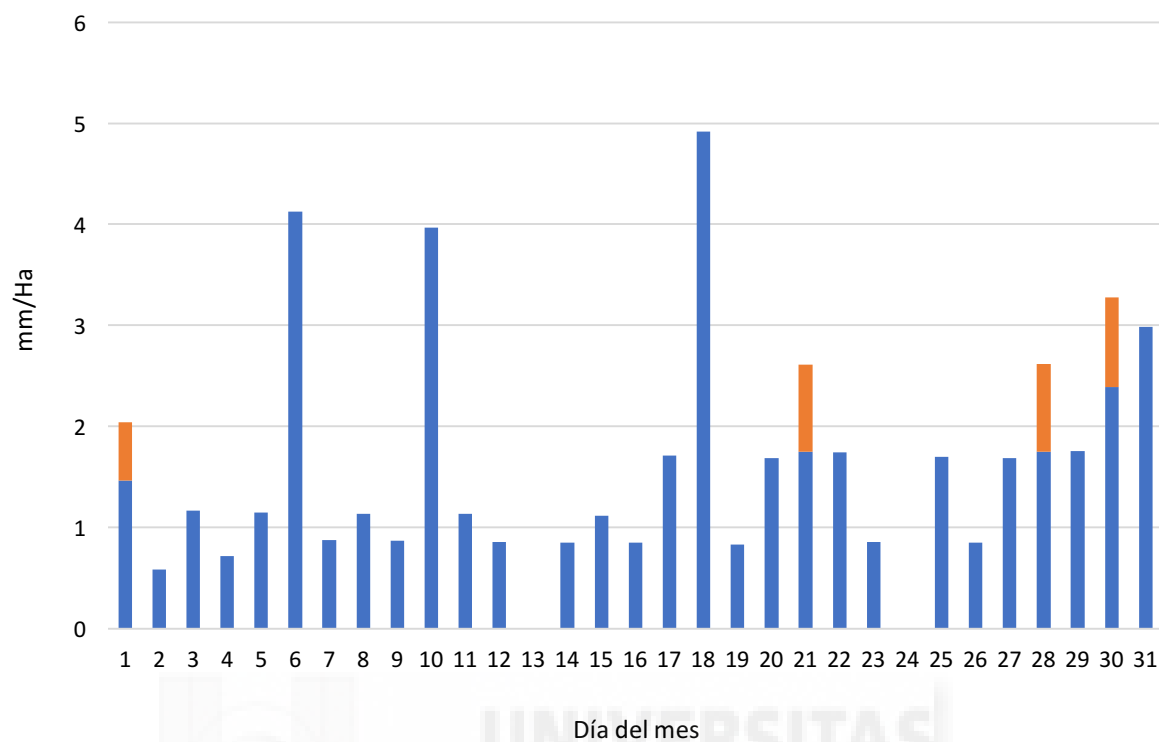


Figura A.3: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de julio de 2016

Tabla A.4: Resumen del consumo hídrico del mes de julio de 2016.

Nº de riegos en el mes de julio de 2016	33
Consumo hídrico total del mes de julio de 2016 (mm/ha)	50,69

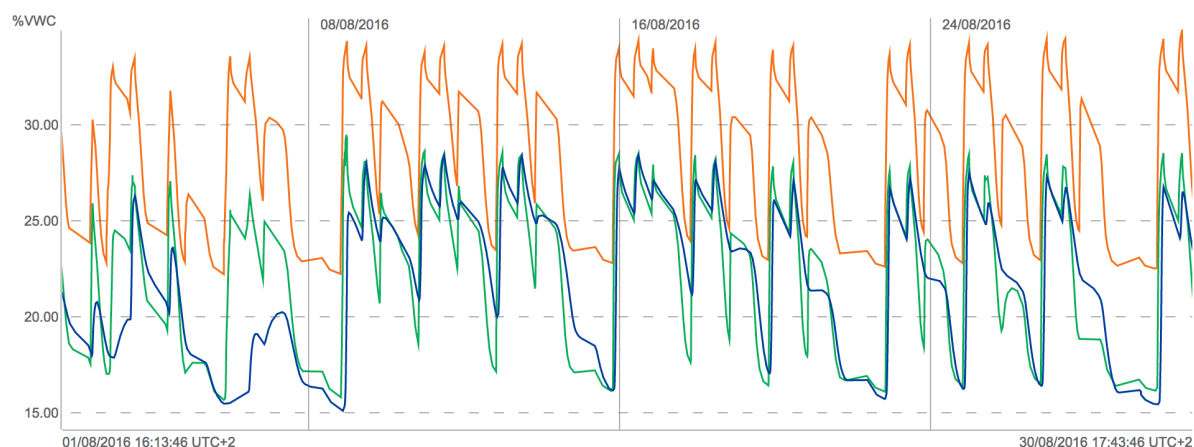


Figura A.5: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de agosto de 2016.

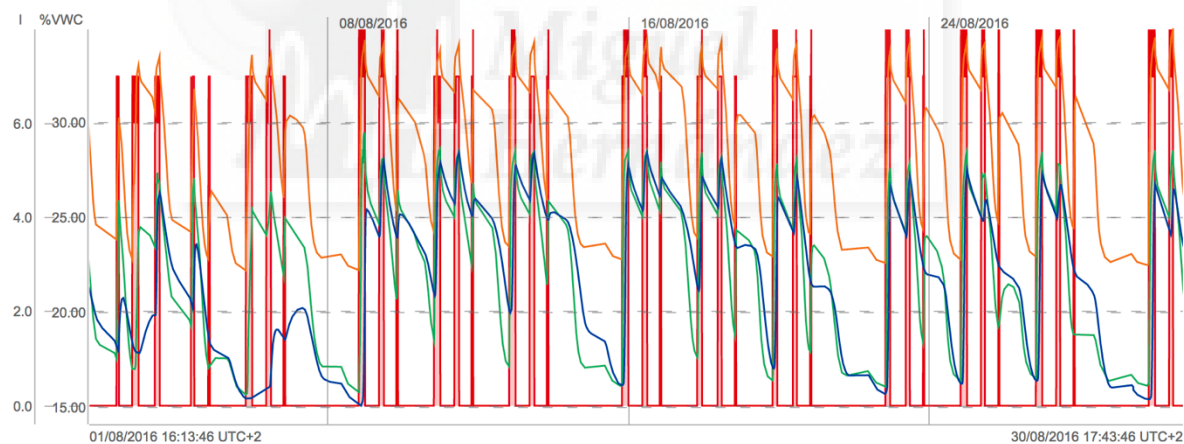


Figura A.6: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de agosto de 2016.

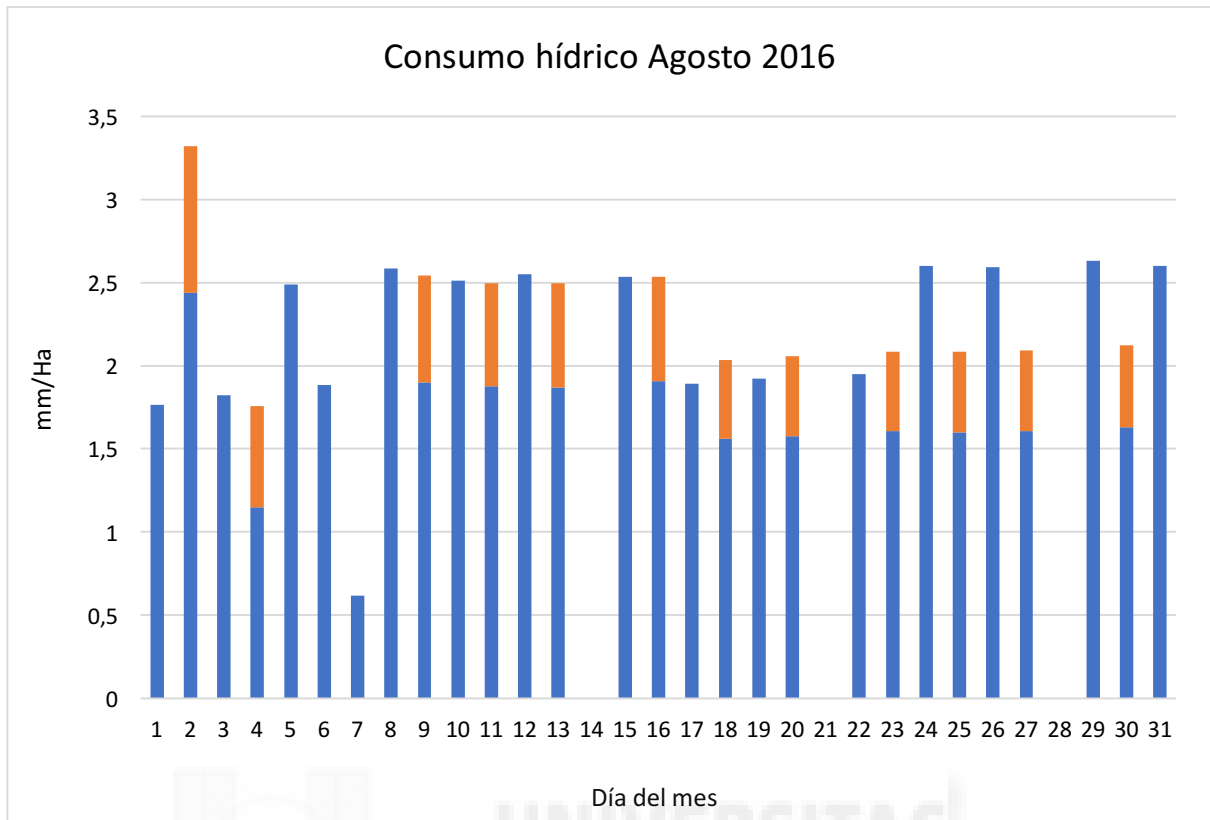


Figura A.7: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de agosto de 2016

Tabla A.8: Resumen del consumo hídrico del mes de agosto de 2016.

Nº de riegos en el mes de agosto de 2016	40
Consumo hídrico total del mes de agosto de 2016 (mm/ha)	62,59

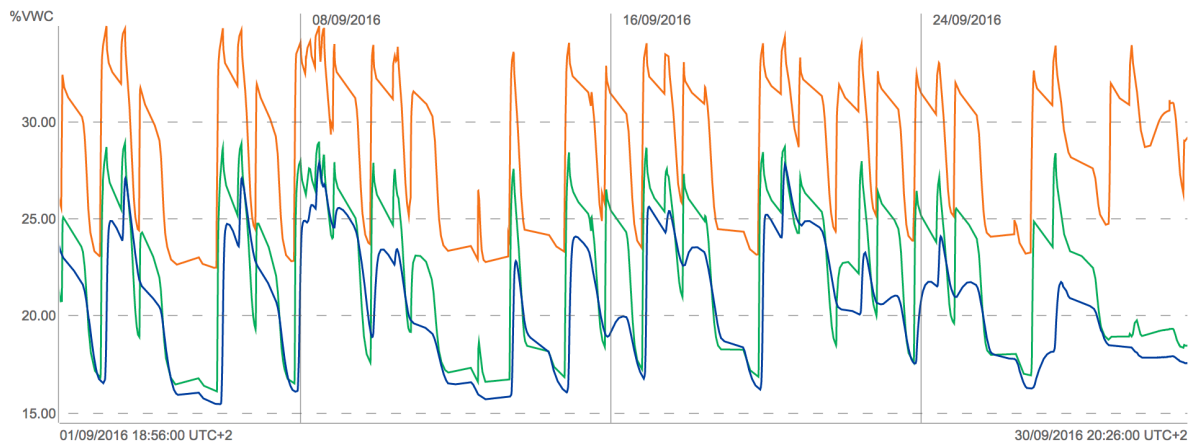


Figura A.9: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de septiembre de 2016.

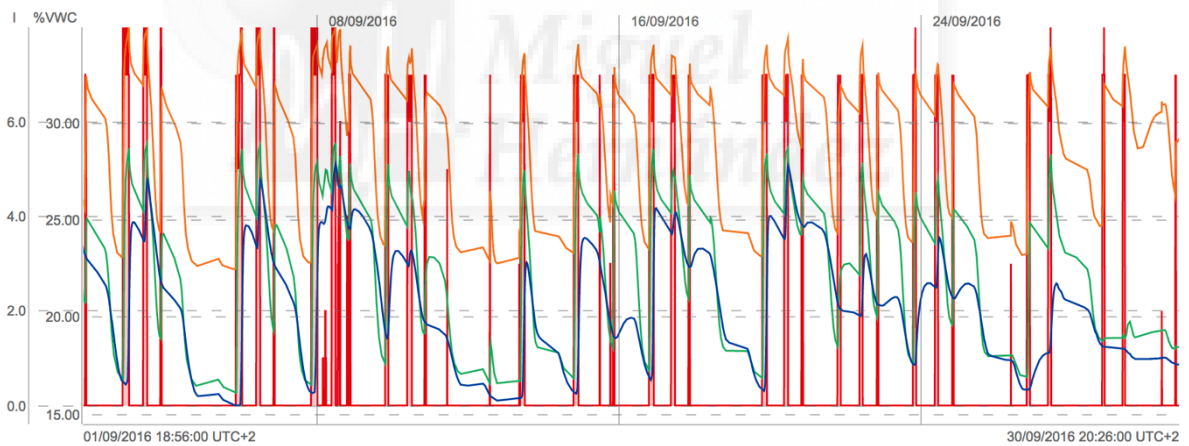


Figura A.10: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de septiembre de 2016.

Consumo hídrico Septiembre

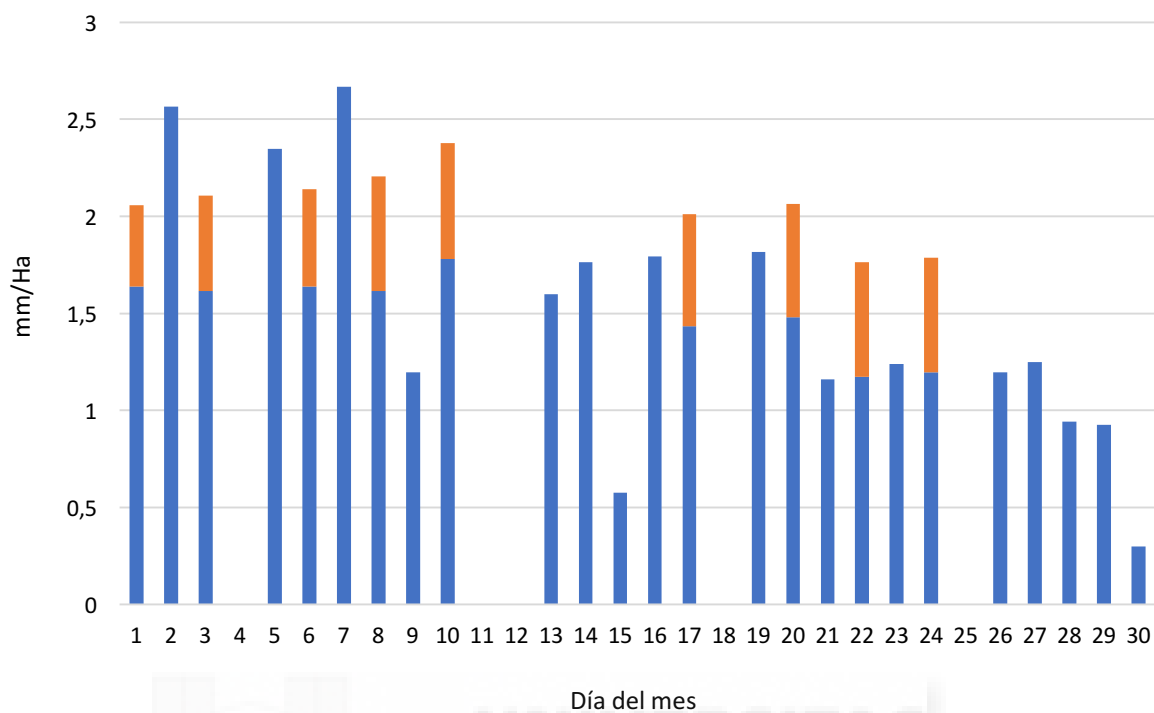


Figura A.11: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de septiembre de 2016

Tabla A.12: Resumen del consumo hídrico del mes de septiembre de 2016.

Nº de riegos en el mes de septiembre de 2016	34
Consumo hídrico total del mes de septiembre de 2016 (mm/ha)	41,85

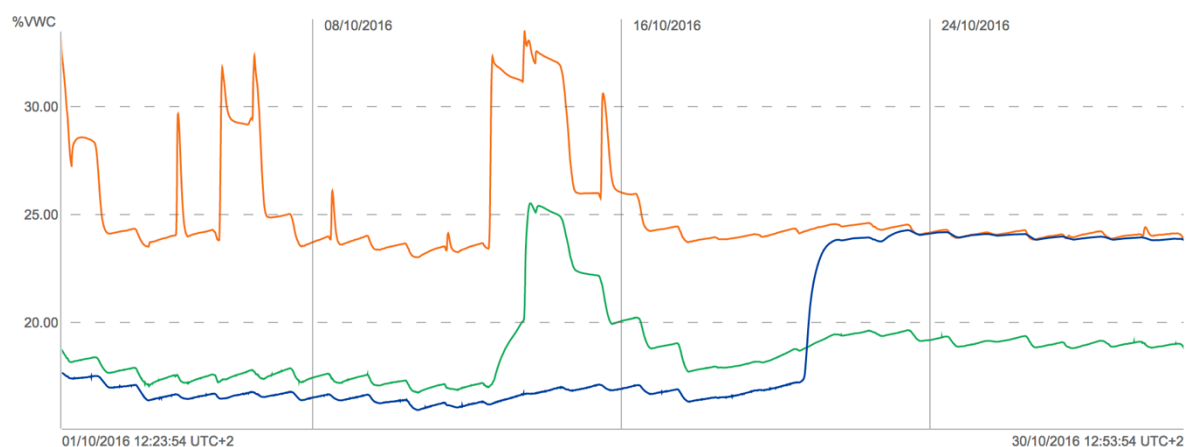


Figura A.13: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de octubre de 2016.

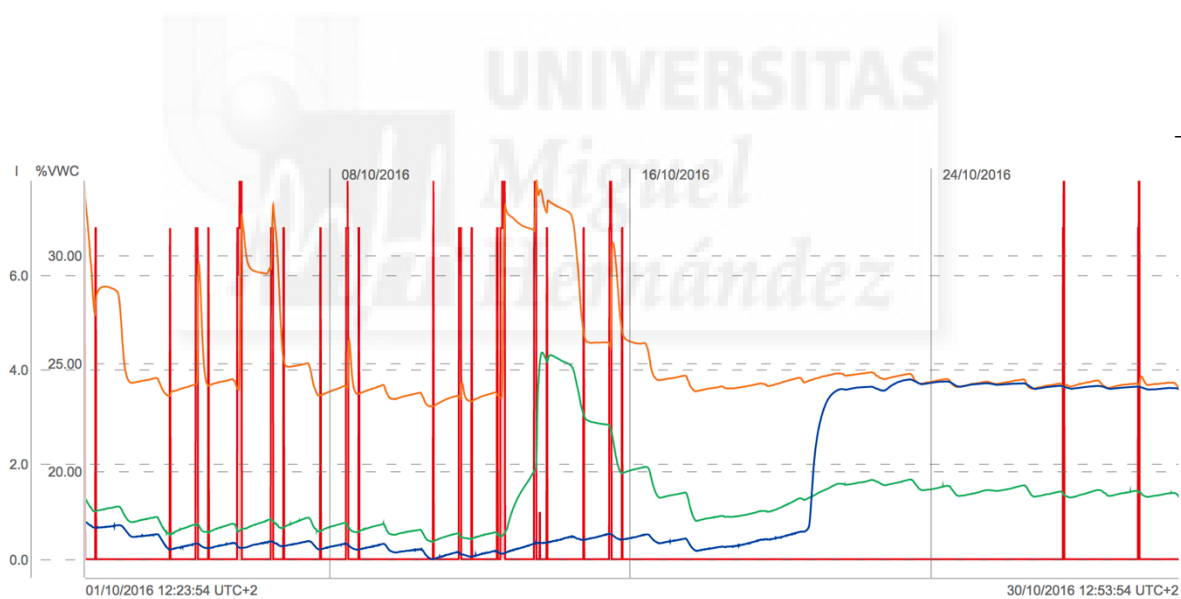


Figura A.14: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de octubre de 2016.

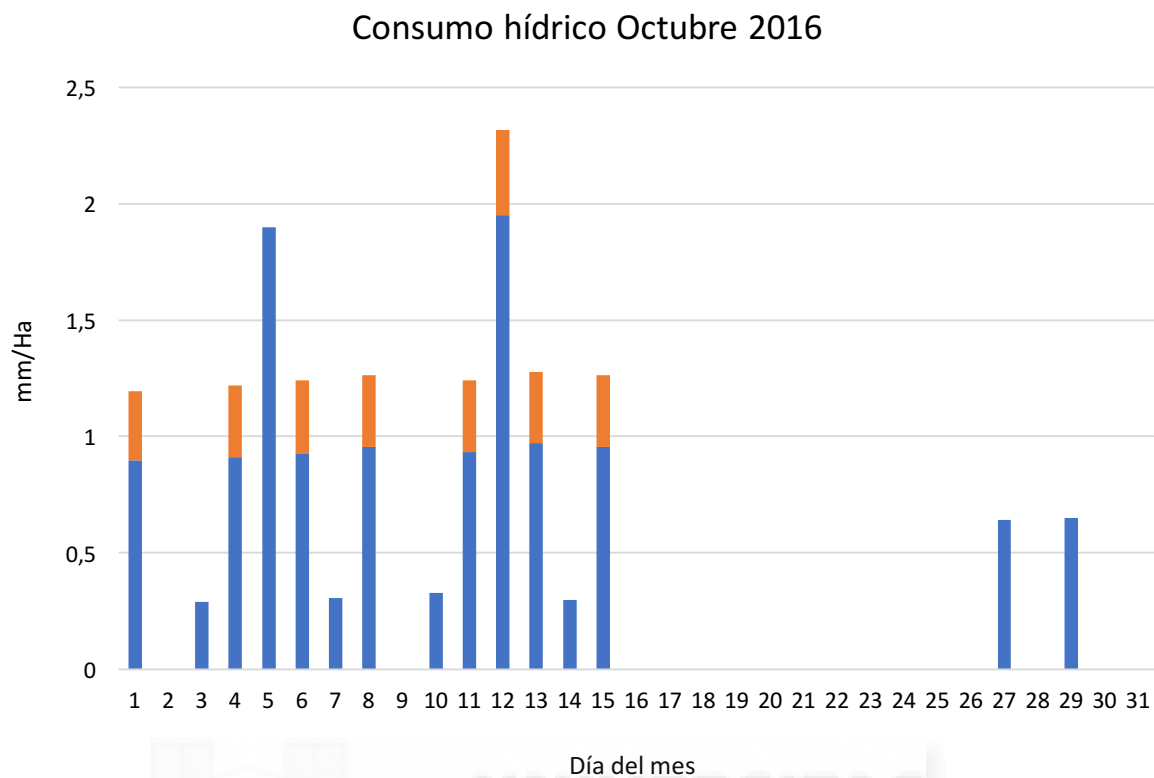


Figura A.15: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de octubre de 2016

Tabla A.16: Resumen del consumo hídrico del mes de octubre de 2016.

Nº de riegos en el mes de octubre de 2016	23
Consumo hídrico total del mes de octubre de 2016 (mm/ha)	15,4

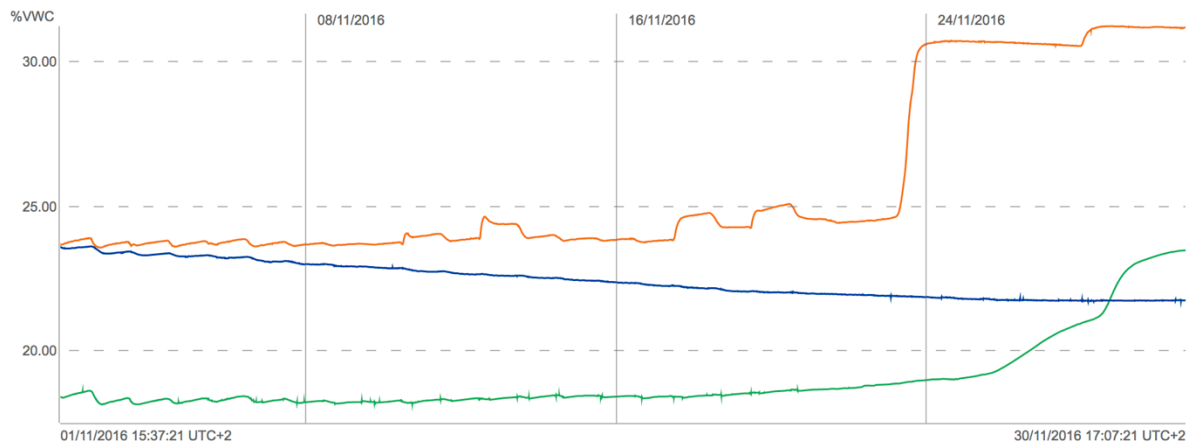


Figura A.17: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de noviembre de 2016.

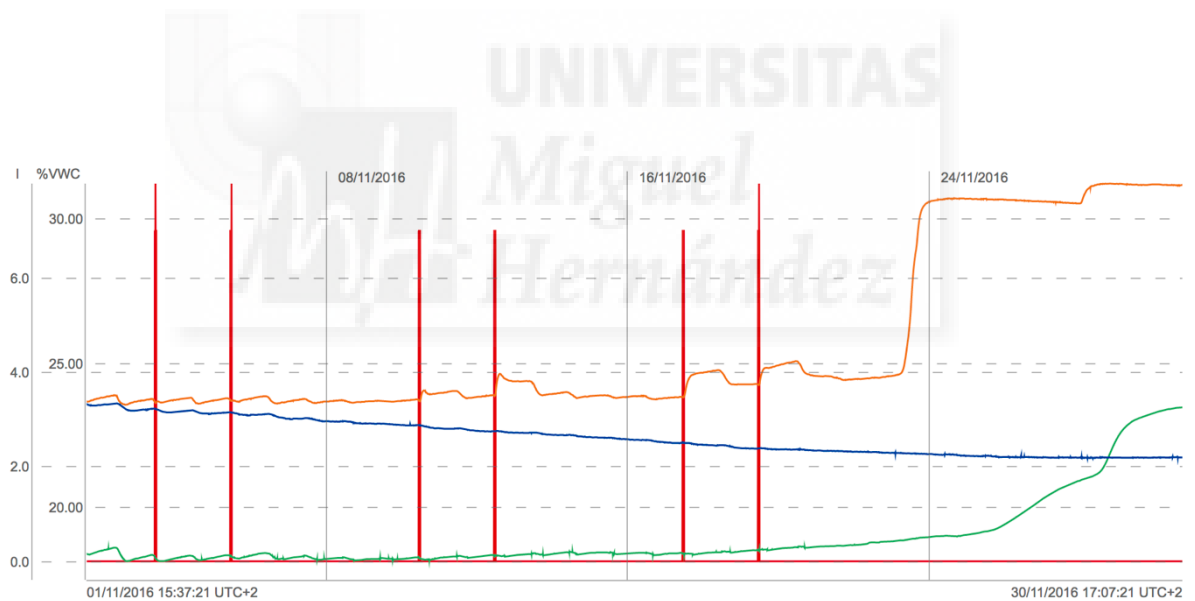


Figura A.18: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de noviembre de 2016.

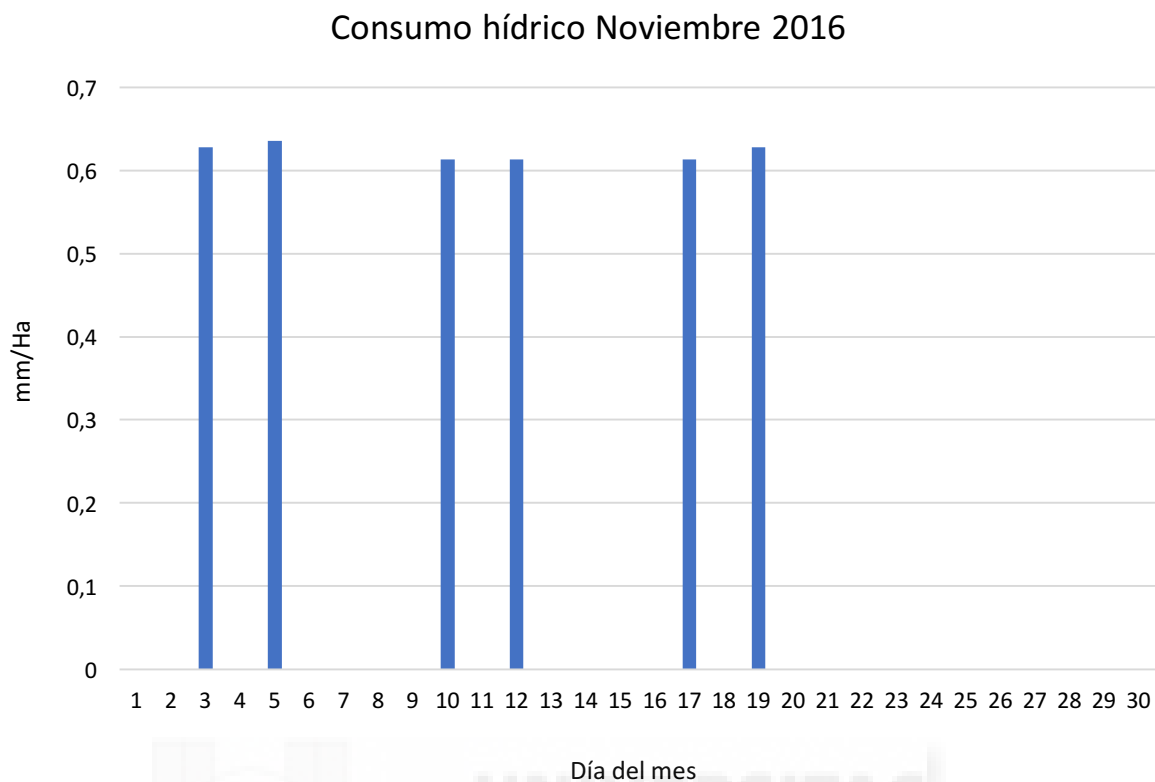


Figura A.19: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de noviembre de 2016

Tabla A.20: Resumen del consumo hídrico del mes de noviembre de 2016.

Nº de riegos en el mes de noviembre de 2016	6
Consumo hídrico total del mes de noviembre de 2016 (mm/ha)	3,73

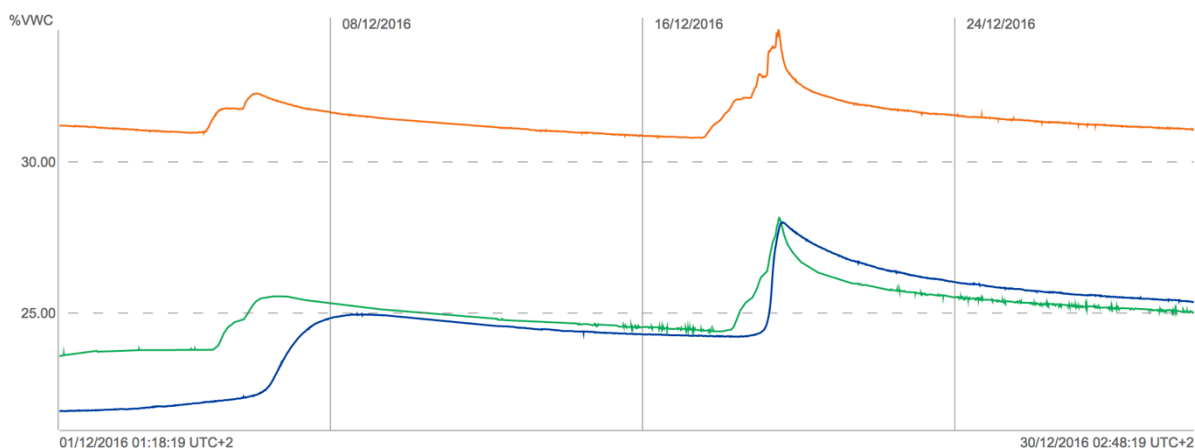


Figura A.21: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de diciembre de 2016.

Tabla A.22: Resumen del consumo hídrico del mes de diciembre de 2016.

Nº de riegos en el mes de diciembre de 2016	0
Consumo hídrico total del mes de diciembre de 2016 (mm/ha)	0

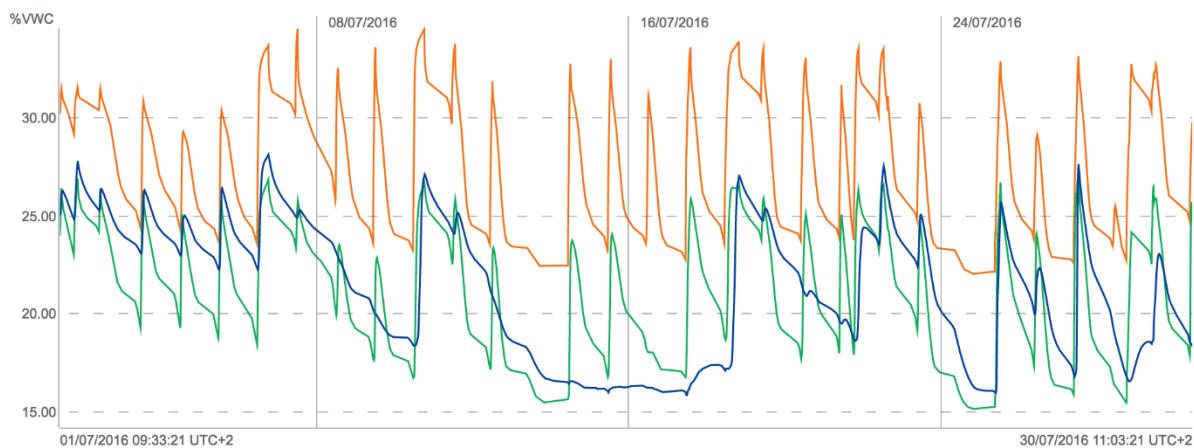


Figura A.23: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de enero de 2017.

Tabla A.24: Resumen del consumo hídrico del mes de enero de 2016.

Nº de riegos en el mes de enero de 2017	0
Consumo hídrico total del mes de enero de 2017 (mm/ha)	0

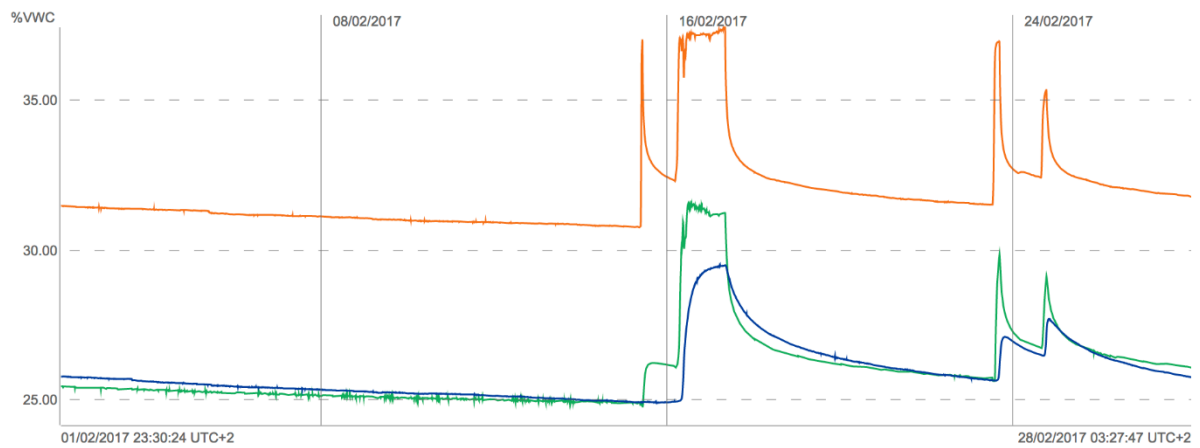


Figura A.25: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de febrero de 2017.

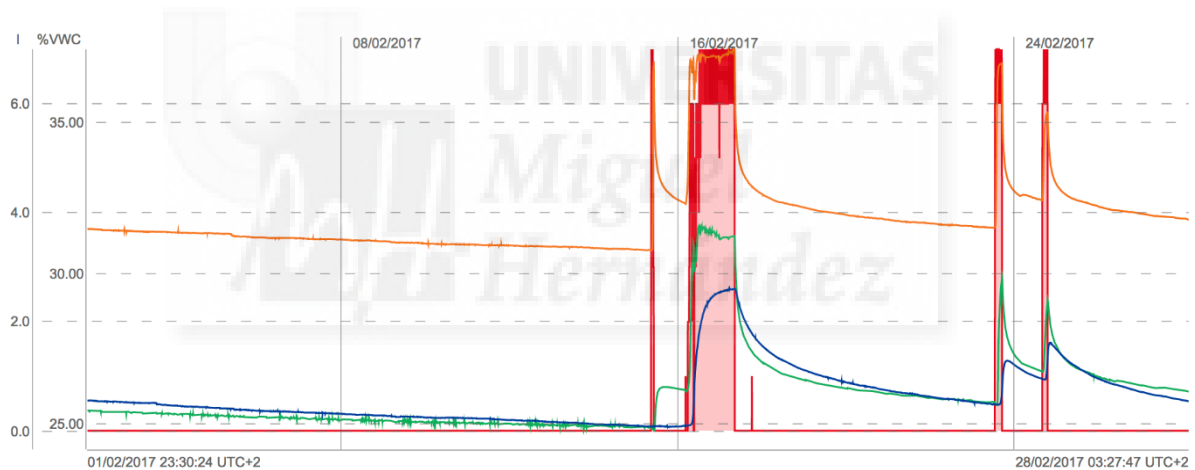


Figura A.26: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de febrero de 2017.

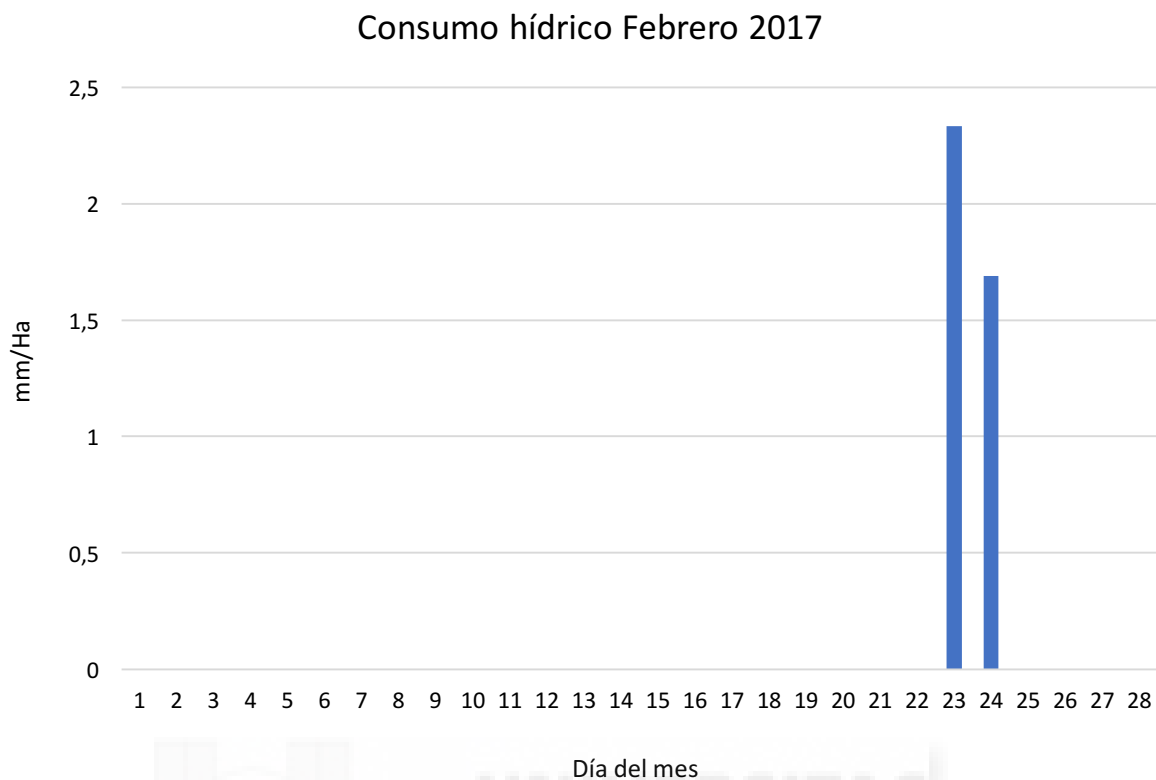


Figura A.27: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de febrero de 2017

Tabla A.28: Resumen del consumo hídrico del mes de febrero de 2017.

Nº de riegos en el mes de febrero de 2017	2
Consumo hídrico total del mes de febrero de 2017 (mm/ha)	4,02

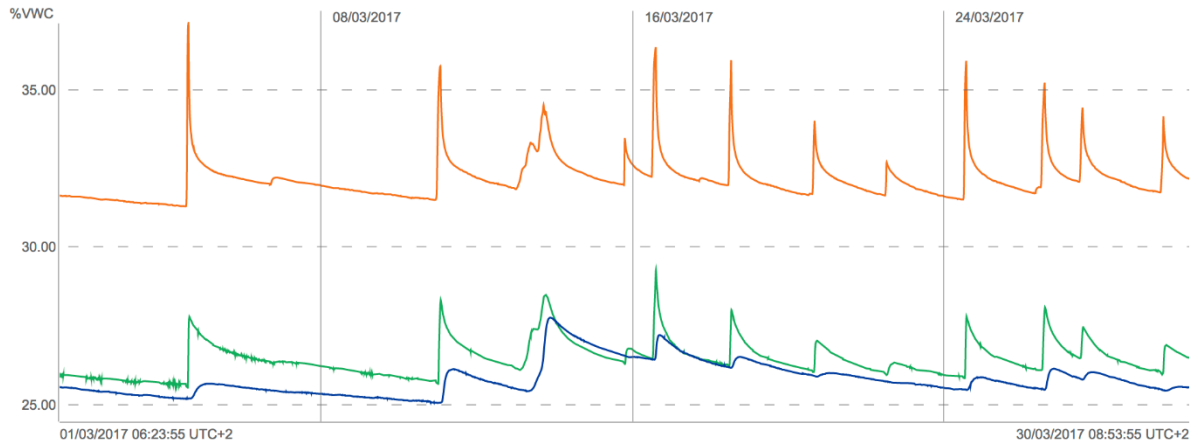


Figura A.29: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de marzo de 2017.

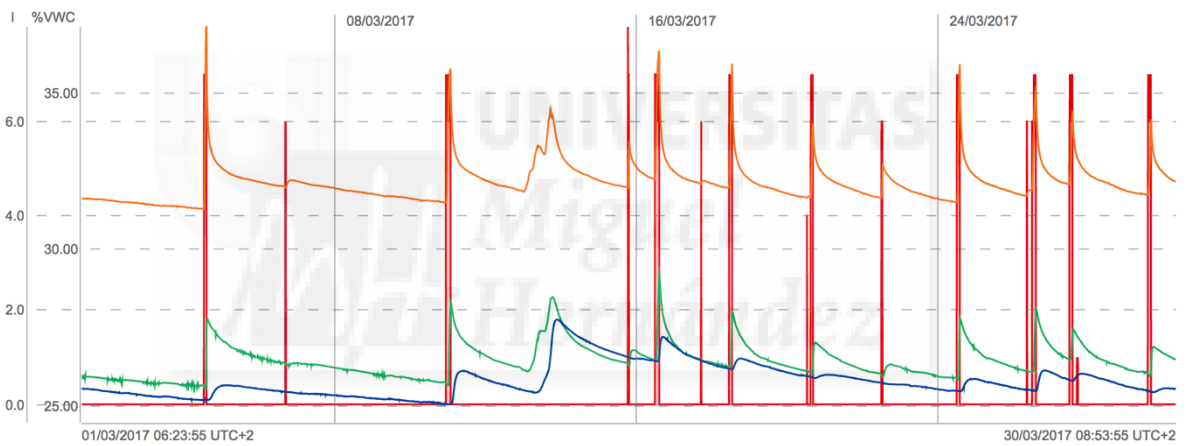


Figura A.30: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de marzo de 2017.

Consumo hídrico Marzo 2017

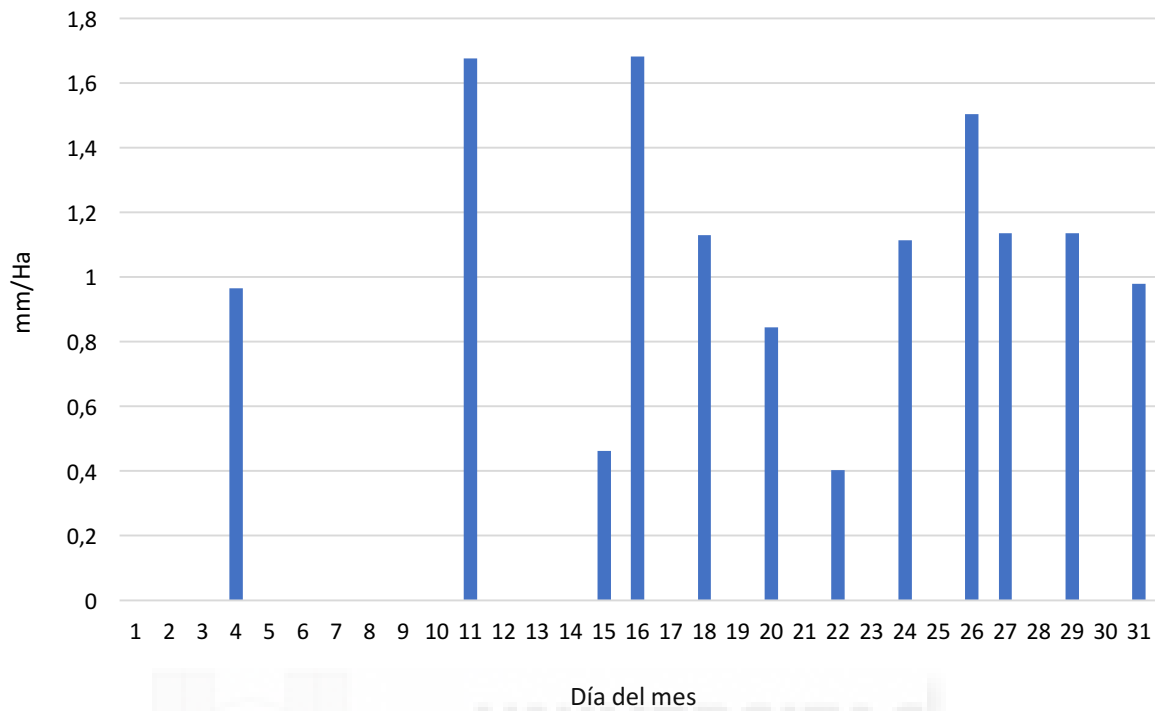


Figura A.31: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de marzo de 2017

Tabla A.32: Resumen del consumo hídrico del mes de marzo de 2017.

Nº de riegos en el mes de marzo de 2017	12
Consumo hídrico total del mes de marzo de 2017 (mm/ha)	13,03

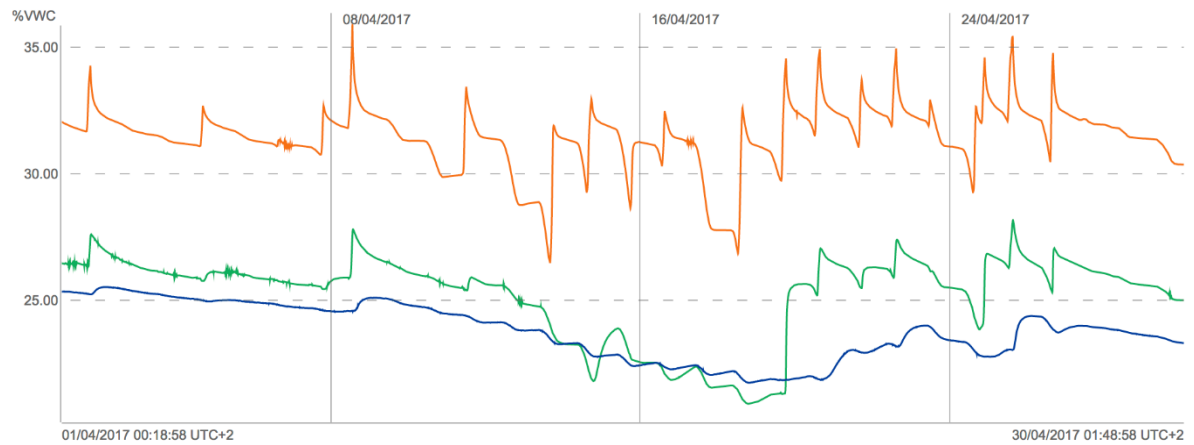


Figura A.33: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de abril de 2017.

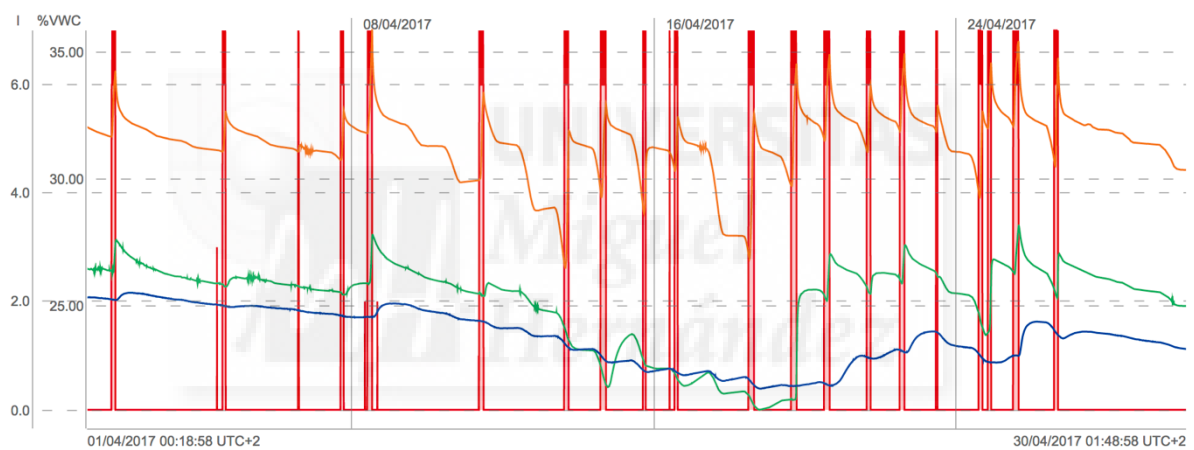


Figura A.34: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de abril de 2017.

Consumo hídrico Abril 2017

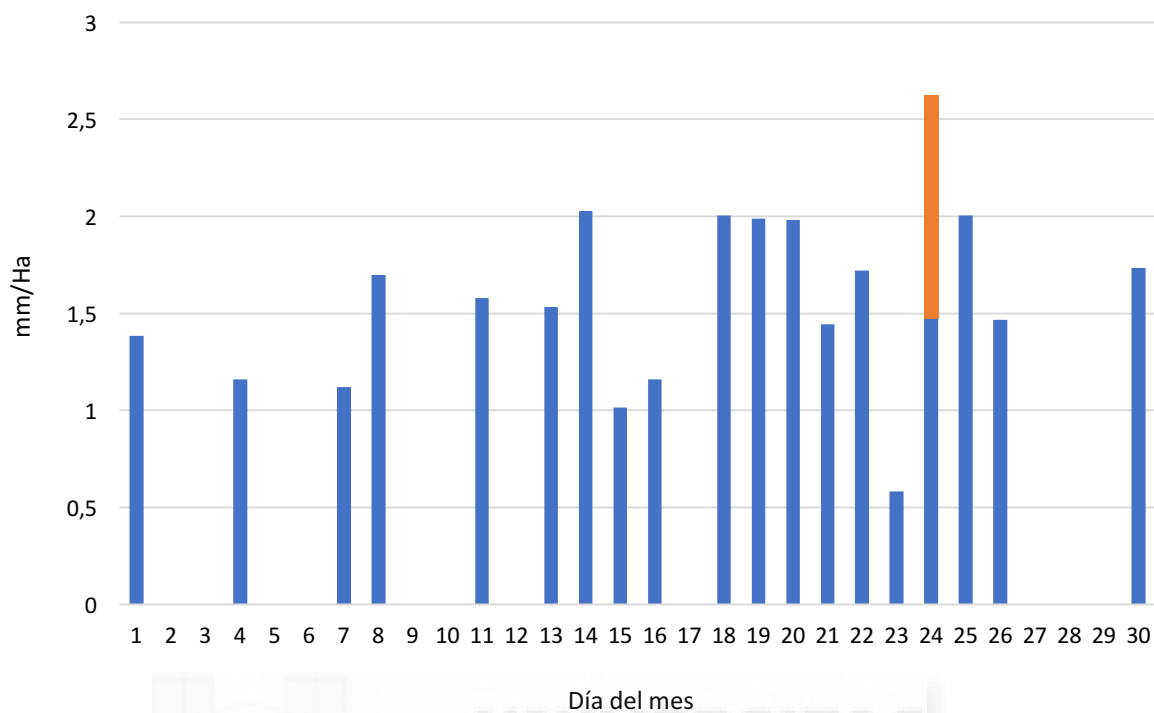


Figura A.35: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de abril de 2017

Tabla A.36: Resumen del consumo hídrico del mes de abril de 2017.

Nº de riegos en el mes de abril de 2017	20
Consumo hídrico total del mes de abril de 2017 (mm/ha)	30,22

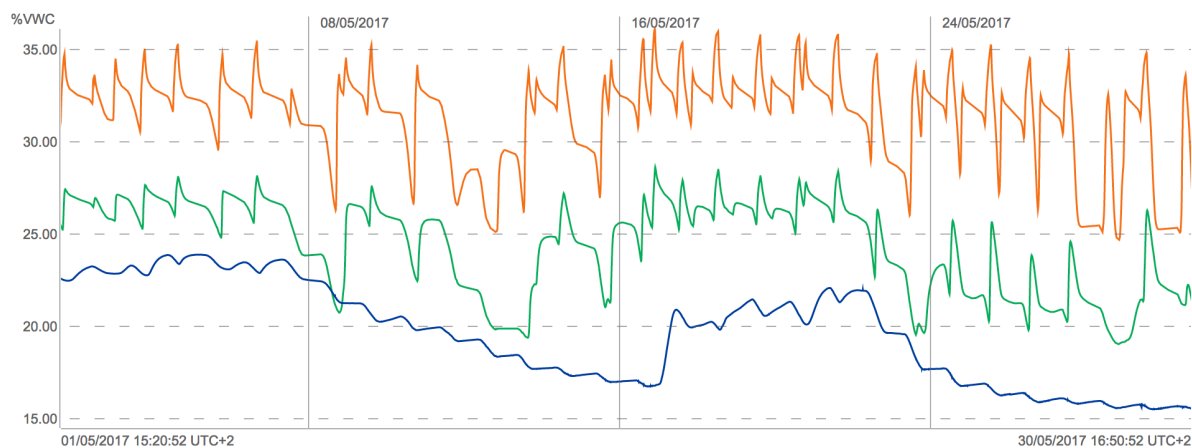


Figura A.37: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de mayo de 2017.

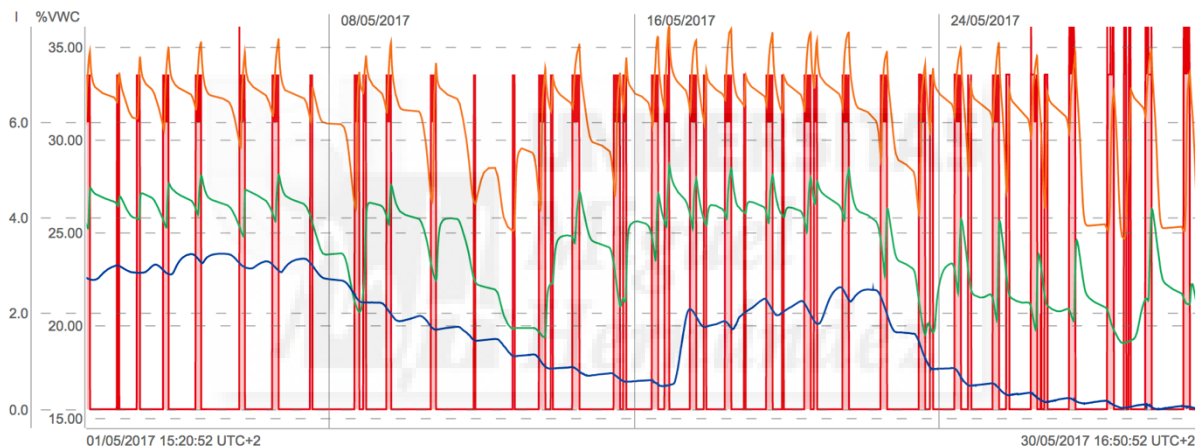


Figura A.38: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de mayo de 2017.

Consumo hídrico Mayo 2017

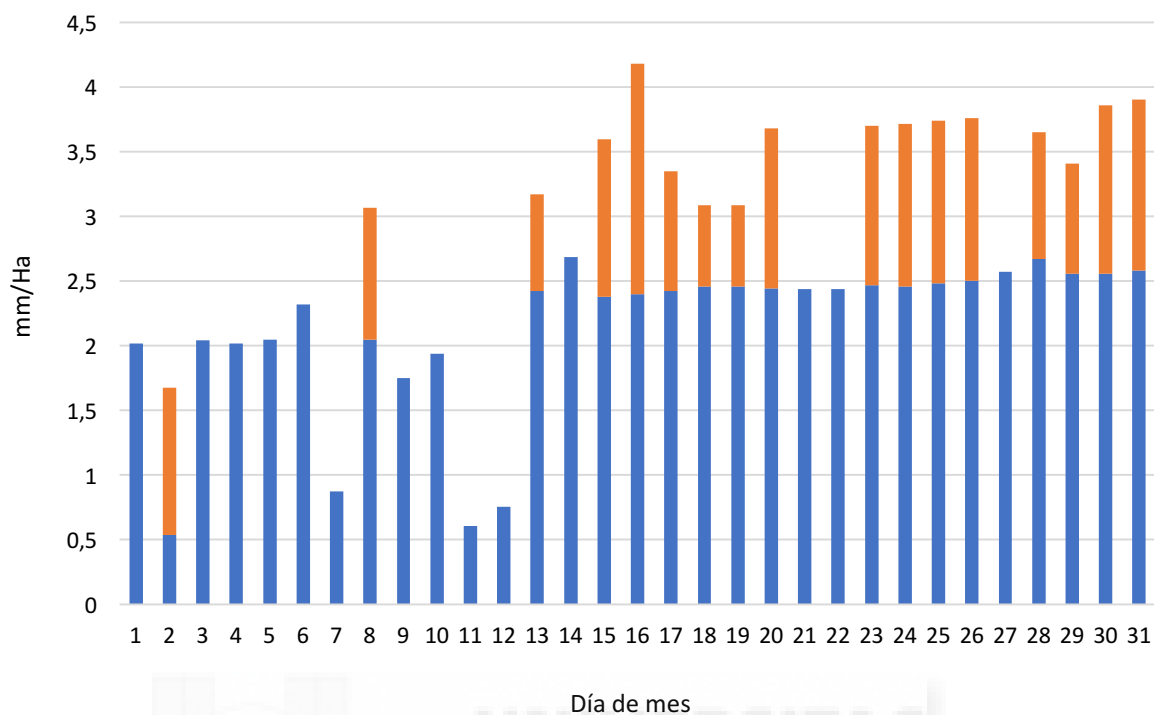


Figura A.39: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de mayo de 2017

Tabla A.40: Resumen del consumo hídrico del mes de mayo de 2017.

Nº de riegos en el mes de mayo de 2017	48
Consumo hídrico total del mes de mayo de 2017 (mm/ha)	85,12

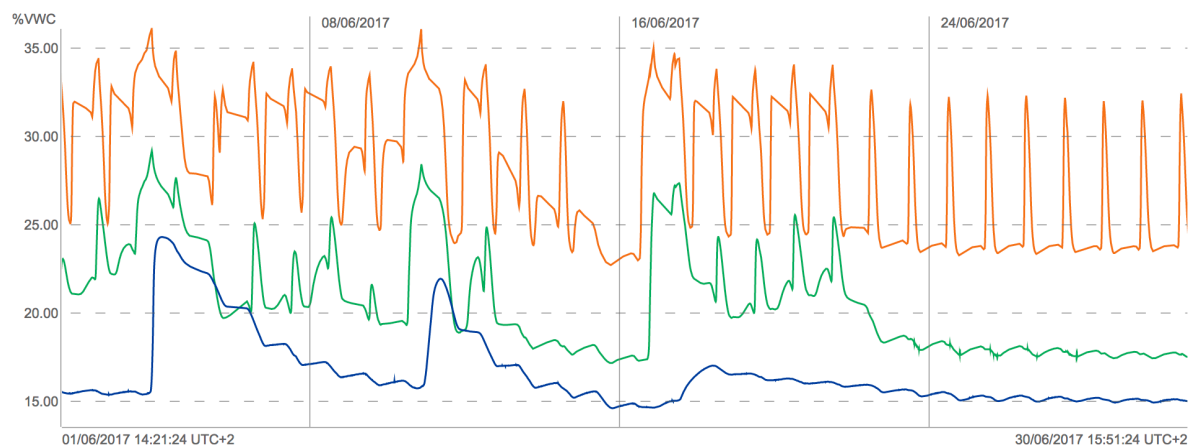


Figura A.41: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) durante el mes de junio de 2017.

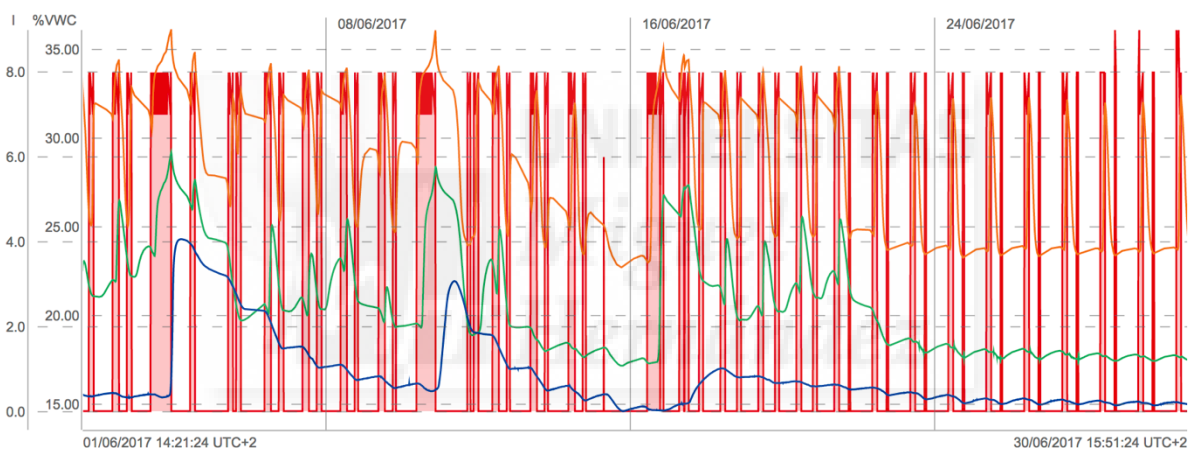


Figura A.42: Variación del contenido volumétrico de agua del suelo (%VWC) a distintas profundidades (--- 20 cm, --- 40 cm y --- 60 cm) en función de los riegos (---) aplicados durante el mes de junio de 2017.

Consumo hídrico Junio 2017

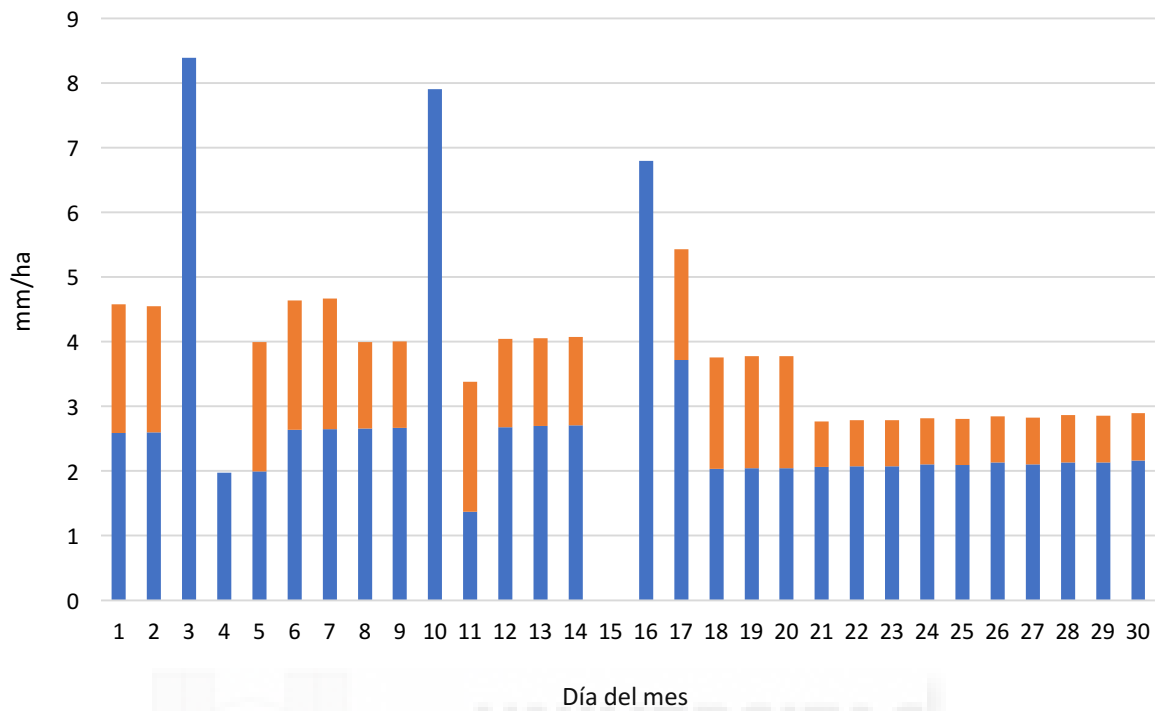


Figura A.43: Consumo hídrico diario (mm/ha) en el mes de junio de 2017

Tabla A.44: Resumen del consumo hídrico del mes de junio de 2017.

Nº de riegos en el mes de junio de 2016	54
Consumo hídrico total del mes de junio de 2016 (mm/ha)	116,06

Anexo 2: Resultados de los nutrientes analizados en la extracción del lisímetro a 30 cm de profundidad

Tabla A.45: Resultados de los principales nutrientes obtenidos en la extracción del lisímetro.

Nutrientes (ppm)			
Fecha	N-NO3-	K2+	PO43-
1/3/16	10	75	2
10/3/16	0	20	1
6/4/16	10	20	1
21/4/16	25	20	3
3/5/16	5	20	3
18/5/16	10	20	3
7/6/16	500	50	5
24/8/16	10	50	30

