



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Manejo eficiente del riego mediante monitorización con sondas de humedad y herramientas de teledetección

Autor

Luis Grau de Lacruz

Director

Pablo Martín Ramos

Codirector

Jesús Ollés Grúas

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
2018

AGRACEDIMIENTOS

En primer lugar, quisiera expresar mi agradecimiento a Jesús Ollés por darme la oportunidad de participar en el proyecto de I+D+i en el que se inscribe el presente Trabajo.

A Marcosa Riegos, por enseñarme en campo su gran experiencia en instalación y manejo de las sondas de humedad.

Y, como no, a Pablo Martín, por resolver todas mis dudas y hacer que las cosas se vieran más fáciles desde el primer momento.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Revisión del estado de conocimiento	5
1.3.1. Sensores de humedad y otras herramientas para gestionar el riego	5
1.3.2. Teledetección	6
1.3.3. Sensores de humedad y teledetección	7
2. MATERIAL Y MÉTODOS	9
2.1. Localización y antecedentes.....	9
2.2. Climatología.....	10
2.2.1. Bárdenas (Ejea de los Caballeros)	10
2.2.2. Mequinenza.....	10
2.3. Muestras de suelo	10
2.4. Equipos	11
2.4.1. Montaje e instalación.....	11
2.4.2. Ubicación de los equipos.....	15
2.4.3. Descripción de los equipos.....	16
2.5. Metodología	18
2.5.1. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante sensores	18
2.5.2. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante teledetección.....	21
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
3.1. Análisis de suelo e interpretación de los mismos	25
3.2. Datos climáticos	25
3.2.1. Comunidad General de Regantes de Bárdenas.....	25
3.2.2. Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza.....	26
3.3. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante sensores	26
3.3.1. Comunidad General de Regantes de Bárdenas.....	26
3.3.2. Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza.....	30
3.4. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante teledetección.....	35
3.4.1. Comunidad General de Regantes de Bárdenas.....	35
3.4.2. Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza.....	36
4. CONCLUSIONES	45
5. RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	47
6. BIBLIOGRAFÍA.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético	2
Figura 2. Montaje de uno de los equipos del proyecto (Elaboración propia)	11
Figura 3. Equipo nº 8 instalado en campo, Sos del Rey Católico (Elaboración propia)	11
Figura 4. Instalación en campo del equipo nº 5, Sádaba (Elaboración propia)	12
Figura 5. Instalación de una sonda 10 HS del equipo nº 5 (Elaboración propia)	12
Figura 6. Ubicación de los equipos instalados en la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas.....	15
Figura 7. Ubicación de los equipos instalados en la Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza.....	16
Figura 8. Decagon 10 HS soil moisture sensor	16
Figura 9. Decagon 10 HS soil moisture sensor	17
Figura 10. Sentek Drill & Drop.....	17
Figura 11. Decagon MPS-6 calibrated water potential sensor	18
Figura 12. Estación meteorológica iMETOS	18
Figura 13. Vista previa del software Soil Water Characteristics (Saxton & Rawls, 2006)	19
Figura 14. Gráfico de evolución de la humedad del suelo (Equipo nº 6).....	20
Figura 15. Vista previa de la plataforma SPIDERwebGIS (gráfico y valores de NDVI de la parcela estudio)	22
Figura 16. Gráfico de temperaturas del mes de julio de 2017. Datos obtenidos por la estación meteorológica iMetos instalada en parcela (Equipo nº 17).....	25
Figura 17. Gráfico de la humedad del terreno. Datos obtenidos por la sonda Sentek Drill and Drope a profundidades de 20, 30 y 40 cm (Equipo nº 1).....	26
Figura 18. Equipo nº 6 instalado en las proximidades del pívot sobre cultivo de maíz (Elaboración propia).....	28
Figura 19. Evolución de la humedad del terreno. Datos obtenidos por las sondas 10 HS (Equipo nº 6).....	28
Figura 20. Evolución de la humedad del suelo. Datos obtenidos por las sondas 10HS (Equipo nº 5)	30
Figura 21. Evolución de la humedad del terreno. Datos obtenidos por las sondas 10HS (Equipo nº 7).....	31
Figura 22. Evolución de la humedad del terreno. Datos obtenidos por las sondas 10HS (Equipo nº 7).....	31
Figura 23. Evolución de las precipitaciones para el mes de julio de 2017. Datos obtenidos con el equipo nº 7	31
Figura 24. Evolución de la temperatura del aire para el mes de julio de 2017. Datos obtenidos por el equipo nº 7.....	32
Figura 25. Evolución de la humedad del suelo (color azul) y potencial hídrico del suelo (color rojo) medido por el sensor 5TE y el tensiómetro MPS-2 respectivamente (Equipo nº 19)	33

Figura 26. Evolución de la temperatura en la parcela donde está instalada el equipo nº 19. Datos obtenidos por la sonda 5TE del mismo equipo.....	33
Figura 27. Gráfico comparativo del consumo de agua real en la parcela donde se encuentra el equipo nº 18 y las necesidades teóricas de la red SIAR (Elaboración propia)	34
Figura 28. Evolución de la humedad del terreno medida por las sondas 10HS (Equipo nº18) .	34
Figura 29. Evolución del coeficiente K_c de la parcela donde está instalado el equipo nº 17. Datos calculados a partir de la red SIAR y del SPIDERwebSIG (Elaboración propia).	36
Figura 30. Puntos seleccionados en la parcela (arriba) y valores del índice NDVI obtenido por teledetección gracias al <i>software</i> SPIDERwebSIG (abajo).....	37
Figura 31. Evolución de la K_c de marzo a septiembre de 2017 de la parcela 22 del polígono 12 de Mequinzenza. Datos calculados a partir del índice NDVI obtenido en SPIDERwebSIG (Elaboración propia)	38
Figura 32. Fases del almendro en función de sus necesidades hídricas (Gispert Folch, 2018) .	38
Figura 33. Escala de valores del índice NDVI. Obtenida de SPIDERwebSIG	39
Figura 34. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinzenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 17-03-17..	40
Figura 35. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinzenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 06-04-17..	40
Figura 36. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinzenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 20-05-17..	40
Figura 37. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinzenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 15-06-17..	41
Figura 38. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinzenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 20-07-17..	41
Figura 39. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinzenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 04-08-17..	41
Figura 40. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinzenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 08-09-17..	42
Figura 41. Comparación de la ET_o de la parcela 17 del polígono 16 de Mequinzenza calculada con los datos de la red SIAR (teórica) y con los datos de la estación meteorológica iMETOS (estación propia) instalada en campo (Elaboración propia).....	42
Figura 42. Evolución del coeficiente K_c de la parcela donde está instalado el equipo nº 18. Datos calculados a partir de la red SIAR y del SPIDERwebSIG (Elaboración propia).	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los diferentes equipos presentes en el estudio (Elaboración propia)	14
Tabla 2. Necesidades hídricas del cultivo del maíz para el mes de junio en la zona de Ejea de los Caballeros. Datos obtenidos de la red SIAR.	27
Tabla 3. Evolución del coeficiente K_c del maíz cultivado en la parcela 52 del polígono 517 de Ejea de los Caballeros. Datos obtenidos de la red SIAR y de SPIDERwebGIS (Elaboración propia)	35

RESUMEN

Los sistemas de riego juegan un papel clave para dar soluciones a la creciente demanda de alimentos y al desarrollo, sostenibilidad y productividad del sector agrícola, que representa más del 70% del consumo de agua dulce en el mundo. El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es demostrar cómo una determinación precisa de las necesidades de agua de los cultivos puede permitir optimizar el uso del agua y energía, consiguiendo así una mejor gestión de las zonas regables, tomando como ejemplo dos Comunidades de Regantes de la provincia de Zaragoza. Para ello se ha recurrido tanto a sensores de humedad y estaciones meteorológicas en parcela como a herramientas de teledetección, evaluando su aplicabilidad a diferentes cultivos, tanto herbáceos como leñosos, y a diferentes sistemas de riego. Los resultados obtenidos demuestran que los sensores de humedad en suelo son de gran utilidad para gestionar el riego a nivel de parcela, al permitir un seguimiento del estado hídrico del suelo en tiempo real y una rápida respuesta por parte del agricultor para ajustar las dosis aplicadas. Por el contrario, la utilidad de las estaciones meteorológicas parece ser mucho más limitada, siendo suficiente la información de la red SIAR. En cuanto a las herramientas de teledetección, constituyen un excelente complemento a la monitorización en campo, facilitando la observación de anomalías a lo largo de la campaña de cultivo y posibilitando el cálculo de coeficientes del cultivo ajustados a la zona de estudio. La combinación de estos enfoques tiene un gran potencial para lograr ahorros significativos en el consumo de agua.

Palabras clave: sondas de humedad, monitorización, K_c , teledetección, satélites, NDVI.

ABSTRACT

Irrigation systems play a key role in providing solutions to the growing demand for food and to the development, sustainability and productivity of the agricultural sector, which represents over 70% of the fresh water consumption in the world. The aim of this Master's Thesis is to demonstrate how a precise determination of the water needs of crops can optimize the use of water and energy, in order to achieve a better management of irrigable areas, taking as an example two Irrigation Communities located in the province of Zaragoza. To this end, both humidity sensors and meteorological stations have been used, as well as remote sensing tools, evaluating their applicability to different crops and to different irrigation systems. The results obtained show that soil moisture sensors are very useful to manage irrigation at a plot level, allowing real time monitoring of soil water status and a rapid response by the farmer to adjust the applied doses. On the contrary, the usefulness of the meteorological stations seems to be much more limited, the information of the SIAR network being sufficient. Regarding remote sensing tools, they would be an excellent complement to field monitoring, facilitating the observation of anomalies throughout the growing season and enabling the calculation of crop coefficients adjusted to the area under study. The combination of aforementioned approaches holds great promise to achieve significant savings in water consumption.

Keywords: soil moisture sensors; monitoring; K_c ; remote sensing; NDVI.

1. INTRODUCCIÓN

El agua de riego de calidad es un bien escaso y cada vez más caro, por lo que el uso eficiente de este recurso es clave para una gestión sostenible en el tiempo y para mejorar la rentabilidad de la agricultura profesional. Lo anterior, junto con unas condiciones ambientales cada vez más cambiantes, hacen que los sistemas para la administración eficiente del riego resulten imprescindibles (Zhu, Chikangaise, Shi, Chen, & Yuan, 2018), más en tanto en cuanto la agricultura representa más del 70% del consumo de agua dulce en el mundo.

Los sistemas de riego deben ser un agente relevante para dar soluciones a la creciente demanda de alimentos y al desarrollo, sostenibilidad y productividad del sector agrícola. El diseño, gestión y operación de estos sistemas son factores cruciales para lograr un uso eficiente de los recursos hídricos y el éxito en la producción de cultivos (Holzapfel, Pannunzio, Lorite, de Oliveira, & Farkas, 2009).

La mejora de la eficiencia del uso del agua de riego (es decir, la relación entre el agua aplicada y rendimiento de los cultivos) se puede lograr cultivando cultivos más eficientes en el uso del agua o mediante la aplicación de tecnologías de riego optimizadas. La eficiencia de riego depende del tipo de riego utilizado y de la programación de riego, que es el método utilizado para determinar la cantidad de agua que se aplicará a un cultivo y el momento exacto.

La disponibilidad de herramientas y metodologías adecuadas para identificar fácilmente el estado del agua del cultivo en condiciones de operación es, por lo tanto, crucial (Masseroni et al., 2017).

1.1. Motivación

El objetivo del riego en la Agricultura es cubrir las necesidades de agua del cultivo de forma precisa, oportuna y lo más uniforme posible. Sin embargo, para maximizar los beneficios del riego de precisión, deben habilitarse e incorporarse a este sector tecnologías avanzadas (Adeyemi, Grove, Peets, & Norton, 2017). Entre ellas, la monitorización de la humedad del suelo resulta particularmente importante para maximizar la eficiencia, ya que permite la aplicación de agua en la cantidad adecuada y en el momento adecuado, mejorando así la gestión de este recurso (Santos et al., 2016).

El monitoreo continuo de los flujos de humedad en el sistema suelo-planta-atmósfera es un aspecto fundamental de la gestión de la producción de cultivos en la agricultura de regadío (Adeyemi et al., 2017).

En los últimos años se han desarrollado distintos sistemas que permiten conocer en tiempo real el contenido de humedad del suelo (a los que se hace referencia de forma genérica como *sensores de humedad del suelo*). Estos dispositivos aportan información acerca de la fecha de inicio y final de los riegos, ritmo y profundidad de absorción de agua por la planta, situaciones de estrés hídrico, balance de agua en el suelo, movimiento del agua en el perfil e incluso problemas de infiltración. De este modo, se facilita la toma de decisiones en la programación del riego tales como la determinación de la dosis de agua a aplicar –evitando así posibles

disminuciones de la producción- o el momento de realizar la aplicación. Al margen de estas mejoras en la gestión del riego y ahorros de energía, la utilización de sondas de humedad para controlar la cantidad de agua o de tensiómetros también permite reducir los impactos ambientales derivados de la actividad agrícola (al evitar pérdidas por percolación de fertilizantes y pérdidas excesivas de agua por percolación profunda o por escorrentía).

Otra de las tecnologías avanzadas que en los últimos años viene implantándose en Agricultura es la teledetección de los cultivos. La teledetección agrícola es una técnica que permite obtener información de la vegetación sin necesidad de contacto directo con la misma. Agronómicamente hablando, permite visualizar diferencias en el aspecto del cultivo a través de imágenes.

Entre otras funcionalidades, esta tecnología permite conocer el estado vegetativo de los cultivos, extrapolando dicha información para la gestión del riego, idealmente en conjunción con sensores de humedad en campo. Entre estos últimos, autores como Zhu et al. (2018) han destacado la especial importancia del desarrollo de aplicaciones basadas en sensores inalámbricos para aumentar la eficiencia, productividad y rentabilidad de las labores agrícolas.

Aunque hoy en día es muy común el uso de teledetección con drones, en este caso vamos a utilizar la teledetección satelital. Como su propio nombre indica, se lleva a cabo con satélites y su sistema de teledetección es pasivo, ya que se sirve de la radiación emitida por los objetos de su estudio para recoger datos.

Las imágenes satelitales están compuestas de bandas del espectro electromagnético (Figura 1), a partir de las cuales se pueden implementar índices de vegetación, que permiten resaltar características de la vegetación con utilidad para el manejo agronómico de los cultivos. Con esos resultados, se pueden tomar decisiones relacionadas tácticas y estratégicas relacionadas con el riego o la fertilización, entre otros.

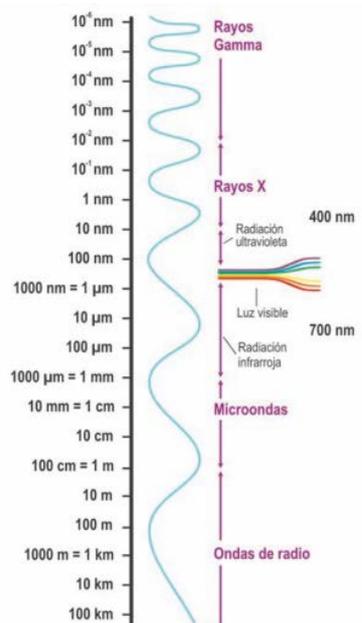


Figura 1. Espectro electromagnético

En teledetección, lo habitual es caracterizar a las ondas electromagnéticas por su longitud de onda en micrómetros o nanómetros, es decir, por la posición que ocupan dentro del espectro electromagnético, quedando así definidas varias regiones del espectro. Aunque por conveniencia se asignan diferentes nombres a estas regiones (ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, etc.), no existen divisiones exactas entre unas y otras.

Los sensores montados a bordo de los satélites de teledetección son capaces de detectar y grabar radiaciones de las regiones no visibles del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas.

Actualmente, el gran potencial que ofrece esta tecnología se refleja en la extensa oferta de imágenes captadas por multitud de satélites que orbitan nuestro planeta (LANDSAT, SPOT, SRTM, NOAA-AVHRR, Aqua y Terra, Copernicus, etc.). Existen tanto de acceso público como de pago. Estas se diferencian principalmente en la resolución de la imagen multispectral.

En lo que respecta a las resoluciones, distinguimos:

Resolución espacial

La resolución espacial es una medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene representada por un píxel. Cuanto mayor sea la resolución espacial, es decir, menor superficie represente un píxel de la imagen, más pequeños serán los objetos que se pueden distinguir en la superficie y viceversa.

Resolución espectral

Se define la resolución espectral de un sensor como el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar. Un incremento en la resolución espectral resultará en un número mayor de canales o bandas espectrales.

Resolución radiométrica

La resolución radiométrica de los datos de teledetección se define como la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital.

Resolución temporal

La resolución temporal es el ciclo de repetición, o intervalo de tiempo, entre dos adquisiciones de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie y depende, en gran medida, de las características orbitales del satélite. También se la denomina periodo de revisita. La posibilidad de captar imágenes de una misma zona de la superficie terrestre en diferentes periodos de tiempo o épocas del año, es una de las características más importantes de los satélites de teledetección.

A continuación, se van a comentar las características de los satélites utilizados en este proyecto, Landsat 8 y Sentinel 2 (A y B).

El satélite Landsat-8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y se trata de un satélite óptico de resolución media. El Landsat-8 tiene un tiempo de revisita de 16 días. Este satélite contiene dos sensores:

- *Operational Land Imager* (OLI) está formado por 9 bandas espectrales que van desde el visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Las imágenes cuentan con resoluciones espaciales que oscilan entre los 15 m y los 30 m.
- *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) está compuesto por dos bandas espectrales que detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra.

Por otro lado, el satélite Sentinel 2-A fue lanzado en 2015 y el Sentinel 2-B fue lanzado el 7 de marzo de 2017. El tiempo de revisita, estando ambos satélites operativos, es de 5 días. Están dotados de una cámara multispectral de alta resolución con 13 bandas espectrales con distintas resoluciones espaciales (10 m, 20 m o 60 m) que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y de la vegetación.

En nuestro caso, la teledetección mediante satélite nos va a servir para la obtención de un índice concreto, el *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)*, que es el índice de vegetación más utilizado. Este índice nos permite estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación en base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del *espectro electromagnético* que la vegetación emite o refleja.

Según Bousbih et al. (2017), el índice NDVI calculado a partir de imágenes ópticas Landsat reveló una fuerte correlación con las mediciones *in situ* de índice de área foliar (IAF). Además, observaron una fuerte correlación entre las estimaciones de humedad del suelo (a partir de imágenes multispectrales) y los eventos de precipitación.

1.2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es demostrar cómo la determinación precisa de las necesidades de agua de los cultivos mediante el uso de sensores de humedad y teledetección permite optimizar el uso del agua y energía a escala de parcela, consiguiendo así una mejor gestión de las zonas regables. Para conseguir el objetivo final se plantea actuar a través de medidas preventivas basadas en un adecuado manejo agronómico (principalmente del riego).

Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar las mejoras en términos de aprovechamiento del agua y energía derivadas de la optimización del riego a través de ensayos de campo.
- Identificar qué herramientas aportan más valor para la toma de decisiones (sondas de humedad, tensiómetros y teledetección).
- Difundir los resultados en el sector del regadío aragonés.

1.3. Revisión del estado de conocimiento

1.3.1. Sensores de humedad y otras herramientas para gestionar el riego

En 2016 se llevó a cabo un estudio cuyo objetivo fue evaluar el almacenamiento de agua en el perfil del suelo cuando se utiliza un sistema de riego por goteo sub-superficial a dos profundidades de instalación de emisor (0,20 o 0,40 m) en dos ciclos de cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en Campinas-SP (Brasil). Los factores estudiados incluyeron la instalación del tubo de goteo a dos profundidades (0,2 y 0,4 m) y la técnica utilizada fue TDR (reflectometría en el dominio del tiempo), evaluándose la humedad en el perfil del suelo mediante la instalación de cinco sondas con varillas de 0,2 m hasta 1,0 m de profundidad. Gracias a las sondas instaladas se pudo apreciar que la instalación del tubo de goteo a 0,2 m de profundidad proporcionaba agua en la región de mayor desarrollo radicular, con una reducción de las pérdidas de agua por evaporación y por percolación profunda, demostrándose que era una buena solución tanto para la gestión ambiental como para la eficiencia en el uso del agua (Santos et al., 2016).

La evapotranspiración de cultivos (ETc) es una información esencial para la programación de riego, y se puede calcular utilizando la temperatura de la superficie. Los avances recientes en el campo de los termómetros infrarrojos inalámbricos (IRT) han hecho que la medición de la temperatura de la superficie sea una alternativa viable a las mediciones *in situ* del perfil de agua del suelo. En concreto, los IRT inalámbricos pueden ser empleados en sistemas de riego en movimiento, como los pivots. Este avance fue recogido en un estudio desarrollado en Bushland, Texas, EE.UU., que obtuvo resultados prometedores para cultivos de maíz (*Zea mays* L.), algodón (*Gossypium hirsutum* L.) y sorgo de grano (*Sorghum bicolor* L.). Teniendo en cuenta que más de la mitad del área irrigada en los EE.UU. hace uso de estos sistemas de riego, la ETc calculada mediante IRT puede ser gran utilidad para aumentar la eficiencia en el uso del agua (Colaizzi, O'Shaughnessy, Evett, & Mounce, 2017).

En un trabajo reciente de Sui and Baggard (2015) se utilizó una red de sensores inalámbricos instalados en tres campos para monitorizar el estado de humedad del suelo y recopilar datos meteorológicos para la programación de riego en la Granja de Investigación de Unidad de Investigación de Sistemas de Producción de Cultivos de USDA-ARS en Stoneville, Mississippi, EE.UU. Entre los equipos había sensores de humedad del suelo y estaciones meteorológicas análogos a los empleados en este TFM. Los sensores de humedad del suelo se instalaron a tres profundidades diferentes en varios puntos de las parcelas estudio y los equipos meteorológicos se montaron en una torre de 3 m de altura. Usando este sistema, se midieron parámetros importantes como la humedad del suelo y las condiciones climáticas, incluida la precipitación, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad, transmitiéndose de forma automática e inalámbrica la información a Internet. Los datos recopilados se utilizaron en la investigación de programación de riego en cultivos de algodón, maíz y soja, logrando llevar a cabo la programación de riegos altamente eficiente, a la vez que se evitaban daños por estrés hídrico a los cultivos.

En España, Ferrándiz Molina (2017) ha compara en su estudio los requerimientos hídricos a través de la metodología del balance hídrico (FAO 56) 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 el Alto Vinalopó (Alicante). Se instalaron tres sondas a diferentes profundidades y se tomaron datos durante 12 meses. Con este sistema y una cuidadosa gestión del balance hídrico, se logró un 46,3% de reducción de agua de riego sin pérdida del rendimiento asociada.

Cabe destacar también el estudio llevado a cabo por Oberholzer, Prasuhn, and Hund (2017), en el que se evaluaron durante siete años (2009-2015) la dinámica de la evapotranspiración y la captación de agua en diferentes cultivos (maíz en grano, maíz ensilado, colza, remolacha azucarera, cebada de invierno y trigo de invierno) bajo las condiciones edafo-climáticas típicas de Suiza. Haciendo uso de un lisímetro de alta resolución que incorporaba en su núcleo sensores FDR, se pudo registrar la dinámica temporal de la extracción de agua del suelo, verificando que el pico del coeficiente de cultivo diario coincidió con el tiempo de floración de todos los cultivos herbáceos. Asimismo, se observaron valores de Kc bajos en los años con disponibilidad limitada de agua (por ejemplo, la colza en 2011 y el maíz en 2015). De acuerdo con el Kc reducido, el agua fácilmente disponible se consumió totalmente hasta una profundidad del suelo de al menos 0,85 m, lo que condujo a rendimientos significativamente menores.

1.3.2. Teledetección

Recientemente se llevó a cabo un estudio enfocado en la estimación de la humedad del suelo y la altura de la vegetación a partir de datos de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), empleando como campo de pruebas un campo de trigo de secano en el suroeste de Francia. Se realizaron observaciones independientes *in situ* de la humedad del suelo y la altura de la vegetación junto con simulaciones de estas cantidades, observándose que la calidad de las estimaciones disminuía de forma notable cuando aumentaba la altura de la vegetación. Esto se atribuyó a que la señal GNSS reflejada se veía menos afectada por el suelo, pues la vegetación reemplazaba gradualmente al suelo como la superficie reflectante dominante cuando la altura de la planta llegaba a ser comparable o mayor que una longitud de onda. Por tanto, se concluyó que la humedad volumétrica del suelo sólo podía estimarse cuando el trigo era más pequeño que la longitud de onda (S. Zhang et al., 2017).

También en el suroeste de Francia, Battude et al. (2017) desarrollaron un modelado de las necesidades de agua y las profundidades totales de riego del cultivo utilizando imágenes satelitales de alta resolución espacial y temporal. La metodología se basaba en datos de teledetección combinados con un modelo de cultivo semi-empírico adaptado a partir del método FAO-56. El modelo se utilizó para evaluar la dinámica de la evapotranspiración real (ETc) y el suministro de agua de cultivos de maíz en grandes áreas y durante años climáticos contrastados. La validación se realizó en 18 campos de maíz y en zonas de riego de mayor tamaño (135 ha a 450 ha) utilizando profundidades de riego totales. Este trabajo permitió cuantificar la capacidad de diferentes métodos para estimar la capacidad de almacenamiento (mapa de suelos vs. datos *in situ*) y el coeficiente de cultivo basal Kcb (valores estándar frente a los valores detectados remotamente) y su impacto en las profundidades totales de riego, demostrándose el excelente potencial de la combinación un modelo agro-meteorológico simple con imágenes satelitales para un monitoreo a gran escala de la profundidad total de riego.

En otro estudio, Xiao, Feng, Yang, and Ding (2015) monitorizaron el estado del agua casi en tiempo real para el trigo de invierno antes de la cosecha con datos satelitales. Se extrajeron siete índices de vegetación como parámetros de teledetección haciendo un uso completo de la reflexión de la superficie terrestre y la temperatura de la superficie terrestre transmitida por datos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS). Se estableció la correlación de cada índice de vegetación y los valores medidos del trigo de invierno y el contenido de agua del suelo en diferentes períodos de crecimiento del cultivo. Los resultados indicaron que los índices de vegetación espacial y temporal estaban estrechamente relacionados con la humedad del suelo y el contenido de agua de trigo de invierno en el condado de Wenxi, provincia de Shanxi (China).

Xu et al. (2018) llevaron a cabo un estudio en Iowa, EE.UU., sobre la relación entre la temperatura superficial terrestre (LST) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en diferentes condiciones de humedad del suelo. El área de estudio fue una de las principales áreas de producción de granos en EE.UU., y el maíz y la soja fueron los principales cultivos. Como herramientas utilizaron el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), como en el estudio referido en el párrafo anterior, y datos del satélite de teledetección terrestre Landsat. Los autores observaron que, si bien las mediciones *in situ* son la forma más fiable de monitorización de la humedad del suelo tanto en la superficie y sub-superficie a varias profundidades, estas mediciones corresponden a datos puntuales que generalmente tienen una cobertura espacial y temporal limitada. Por tanto, concluían que los métodos de teledetección constituían un medio de estimación de la humedad del terreno mejor cuando se trabaja con una gran extensión espacial.

1.3.3. Sensores de humedad y teledetección

Garrido-Rubio et al. (2015) realizaron un ensayo en la finca experimental del CENTER (San Fernando de Henares, Madrid) sobre 3 parcelas en regadío bajo diferentes sistemas de riego y cultivadas con maíz. Se utilizaron imágenes multispectrales (Landsat 7 y 8) para obtener índices de vegetación, en este caso NDVI, desde los que estimar el Kc de una cubierta vegetal, y, paralelamente, los riegos aplicados fueron validados externamente mediante el empleo de sondas de humedad. Los autores concluían que con el valor de Kc estimado a partir de la serie temporal de imágenes de satélite y con la ETo medida por la red SIAR es factible realizar una predicción de las necesidades hídricas con una semana de antelación con un grado de fiabilidad alto. No obstante, aclaraban que las predicciones sobreestimaban ligeramente las demandas, sugiriendo una corrección sistemática con los datos de las sondas de humedad para minorar las desviaciones.

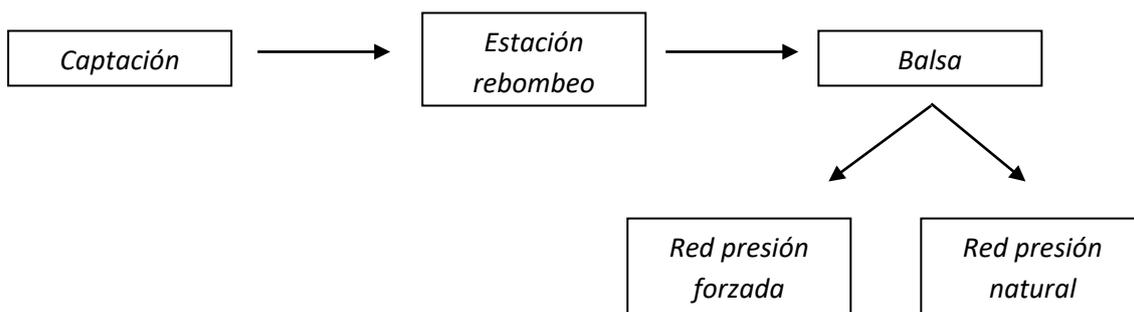
2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Localización y antecedentes

El proyecto se ha desarrollado en la provincia de Zaragoza, en donde se encuentran las dos Comunidades de Regantes participantes: la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas y la Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza.

El ámbito de actuación de la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas comprende 24 Comunidades de Regantes de Base, 41 núcleos de población, así como a las granjas e industrias de la zona regable del sistema. El esquema hidráulico del sistema de Bárdenas está compuesto por el embalse de Yesa, como embalse de cabecera del sistema en el río Aragón, el Canal de Bárdenas, sus acequias derivadas o acequias principales y sus colectores, así como los embalses de regulación interna.

La Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza en la provincia de Zaragoza dispone de 1.543 ha cultivadas con frutales (almendro, olivo, melocotonero y cerezo principalmente). El esquema de la infraestructura hidráulica de esta comunidad es el siguiente:



Existen grandes diferencias de cota entre la captación y la balsa (unos 240 m).

La captación de caudales para la transformación se encuentra en el río Ebro, en el Embalse de Mequinenza (cota 95 msnm). Desde esta captación parte la impulsión 1 que finaliza en la estación de rebombeo en serie que se ubica a la cota 218,35 m. Desde la estación de rebombeo sale la tubería de impulsión 2, que continúa impulsando caudales hasta la balsa de regulación del sistema (cota 336 m). Además, desde la balsa se necesitan dos bombes directos, con una altura manométrica de 87,2 mca y de 61,25 mca respectivamente.

Todo lo anterior nos sirve para adelantar que los costes energéticos (variables) del riego son elevados (comparados con otras transformaciones en regadío con impulsiones “menores”).

En lo que respecta a la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas, mucha más parte de la superficie se riega por presión natural, sin necesidad de bombes tan costosos como en el caso de Mequinenza.

En cuanto a la elección de las parcelas objeto de estudio donde se instalaron los equipos, se seleccionaron aquellas que fueran más representativas para una zona y que posteriormente se pudieran extrapolar los resultados obtenidos a las demás.

En el apartado 2.4, se detalla la ubicación de cada uno de los equipos que forman parte del proyecto en ambas Comunidades de Regantes.

2.2. Climatología

Para llevar a cabo un proyecto de estas características, uno de los aspectos fundamentales a conocer es el clima de las zonas objeto de estudio. Al estar los equipos ubicados en dos áreas climatológicamente diferentes, se hace necesario un estudio por separado.

Para el estudio de los datos climáticos de la zona de Bárdenas se ha tomado como referencia el municipio de Ejea de los Caballeros, empleando datos de la estación meteorológica perteneciente a la Red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) allí situada. Para garantizar la fiabilidad de los datos, se ha procedido también a la instalación de una estación meteorológica propia (modelo iMetos), pudiendo así comparar los datos obtenidos en la misma con los procedentes de la Red SIAR.

En el caso de Mequinenza, la estación meteorológica que se ha tomado como referencia por cercanía es la del municipio de Fraga. Al igual que para el caso de Ejea, en Mequinenza se ha instalado otra estación iMetos para la toma de datos climáticos más precisa de esa zona.

2.2.1. Bárdenas (Ejea de los Caballeros)

El clima de esta zona (característico de la depresión del Ebro) se clasifica como mediterráneo seco continental. En concreto, la clasificación del clima de Köppen-Geiger es Cfb. La temperatura media anual es de 13,2 °C.

Presenta una pluviometría por encima de la media de Aragón (468 mm/año). Estas precipitaciones ocurren mayoritariamente en la primavera y el otoño, siendo el mes de mayo el más lluvioso. Son además de carácter tormentoso, de gran intensidad horaria, favoreciendo los procesos erosivos.

2.2.2. Mequinenza

En Mequinenza el clima es de estepa local, BSk según la clasificación climática de Köppen-Geiger. La temperatura media anual es de 15,8 °C, un poco más elevada que en Ejea. Por otra parte, la precipitación media aproximada es de 396 mm.

2.3. Muestras de suelo

En lo que respecta al trabajo de campo, se procedió primero a tomar muestras de suelo de cada una de las parcelas donde posteriormente se han ubicado los equipos: (11 muestras en Mequinenza y 13 en la zona de la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas), procediéndose a su análisis en el Centro Tecnológico Agropecuario Cinco Villas. Se analizó la textura de cada tipo de suelo, así como otros parámetros físico-químicos relevantes para el estudio (capacidad de campo, punto de marchitez, % de materia orgánica, etc.).

Los resultados de estos análisis son importantes para una correcta colocación de las sondas, puesto que la profundidad de colocación es función del tipo de suelo.

2.4. Equipos

Conforme a lo indicado anteriormente, se ha procedido a la instalación de una serie de equipos en dos comunidades de regantes. En concreto, se instalaron 24 equipos: 13 de ellos en la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas y los 11 restantes en la Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza.

2.4.1. Montaje e instalación

Como paso previo a su colocación en campo, se procedió al montaje y preparación de cada uno de los equipos. Los equipos están alimentados a través de una batería, alimentada a su vez por una placa solar. Cada uno de ellos porta una tarjeta M2M (*Machine To Machine*) que permite la transmisión de datos con el periodo de tiempo que se le asigne.

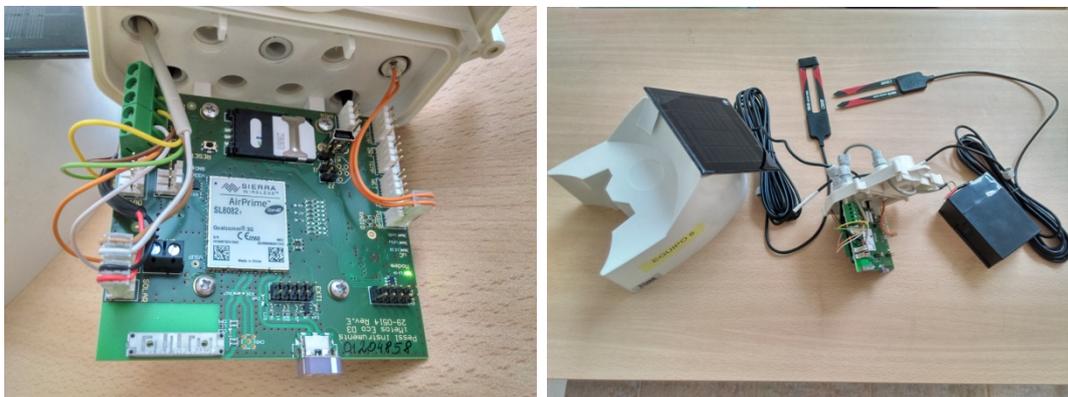


Figura 2. Montaje de uno de los equipos del proyecto (Elaboración propia)

En cuanto a la instalación en campo, cada equipo se colocó sobre un mástil a una altura determinada (2 metros aprox.) y las sondas correspondientes se enterraron a una profundidad concreta (10-60 cm). La mayoría de los equipos llevaban dos sondas, para poder colocarlas a diferentes profundidades.



Figura 3. Equipo nº 8 instalado en campo, Sos del Rey Católico (Elaboración propia)

La instalación de las sondas, la configuración de *datalogger* y la calibración fueron llevadas a cabo bajo la supervisión de Marcosa Riegos, empresa con experiencia en la instalación y asesoría de estos instrumentos. Adicionalmente, se formó al personal de mantenimiento de las Comunidades de Regantes, que también participó en las labores de instalación.

Los equipos descritos anteriormente se dispusieron en diferentes cultivos, tipos de suelo, sistemas de riego, etc. a fin de poder abarcar el número máximo de variables a estudiar en el proyecto. Los datos concretos para cada uno de ellos se resumen en la Tabla 1.



Figura 4. Instalación en campo del equipo nº 5, Sádaba (Elaboración propia)

Durante la instalación se pudo comprobar la importancia de la correcta colocación de las sondas en términos de profundidad en función del tipo de suelo, evitando cámaras de aire y la presencia de piedras alrededor de la sonda.



Figura 5. Instalación de una sonda 10 HS del equipo nº 5 (Elaboración propia)

Puesto que el suelo alrededor de la sonda va a representar al resto de la parcela, es muy importante la superficie a la cual asignamos una sonda, y es imprescindible que el perfil del suelo sea homogéneo en esa superficie para que las lecturas aporten valores reales. También debe tenerse en cuenta la eficiencia del sistema de riego y las eventuales variaciones de caudal entre sectores de riego.

La descarga de datos se puede realizar accediendo al equipo directamente o de forma remota, pues las TIC permiten la lectura a distancia, normalmente por GPRS. El *datalogger* que almacena los datos puede funcionar con baterías o placas solares. La toma de datos en continuo es la opción más recomendable, por sus ventajas frente a la toma de datos puntual, ya que nos permite tener una secuencia de datos y poder consultarlos por periodos de tiempo determinados.

Nº DE EQUIPO	COMUNIDAD	Nº DE SONDAS	PARCELA	POLÍGONO	MUNICIPIO	SISTEMA DE RIEGO	CULTIVO
1	nº XI	2	1	10	Ejea de los Caballeros	Cobertura	Maíz
2	nº II	2	10012	504	Castiliscar	Cobertura	Festuca
3	nº II	2	269	503	Castiliscar	Cobertura	Veza/Girasol
4	nº IV	2	70640	16	Sádaba	Cobertura	Guisante/espínaca
5	nº IV	2	85	12	Sádaba	Cobertura	Alfalfa
6	nº V	3	241	502	Biota	Pívot	Maíz
8	nº I	1	104	33	Sos del Rey Católico	Cobertura	Maíz
10	Acequia Cinco Villas	2	90	19	Tauste (Zaragoza)	Riego a pie	Maíz
13	nº XI	2	419	15	Ejea de los Caballeros	Goteo	Almendro
14	Acequia Cinco Villas	2			Tauste	Cobertura	Maíz
16	nº V	3	5051	104	Ejea de los Caballeros	Cobertura	Habas
17	Sasillo de Ejea y Erla	1	52	517	Ejea de los Caballeros	Aspersión	Maíz
20	nº V	3	3	107	Ejea de los Caballeros	Aspersión	Maíz

Nº DE EQUIPO	COMUNIDAD	Nº DE SONDAS	PARCELA	POLÍGONO	MUNICIPIO	SISTEMA DE RIEGO	CULTIVO
7	Mequinenza	2	22	12	Mequinenza	Goteo	Almendro
11	Mequinenza	3	37	25	Mequinenza	Goteo	Cerezo
12	Mequinenza	1	20	15	Mequinenza	Goteo	Albaricoque
15	Mequinenza	3	650	11	Mequinenza	Goteo	Almendro
18	Mequinenza	2	17	16	Mequinenza	Goteo	Almendro
19	Mequinenza	3	419/427	15	Mequinenza	Goteo	Cerezo
21	Mequinenza	1	11	654	Mequinenza	Goteo	Cerezo
23	Mequinenza	2	571	11	Mequinenza	Goteo	Nectarina
24	Mequinenza	2	11	12	Mequinenza	Goteo	Melocotón
25	Mequinenza	2	13	126	Mequinenza	Goteo	Almendro
26	Mequinenza	2	932	11	Mequinenza	Goteo	Almendro

Tabla 1. Resumen de los diferentes equipos presentes en el estudio (Elaboración propia)

2.4.2. Ubicación de los equipos

En la Figura 6 y la Figura 7 se muestra la ubicación de cada uno de los equipos instalados:

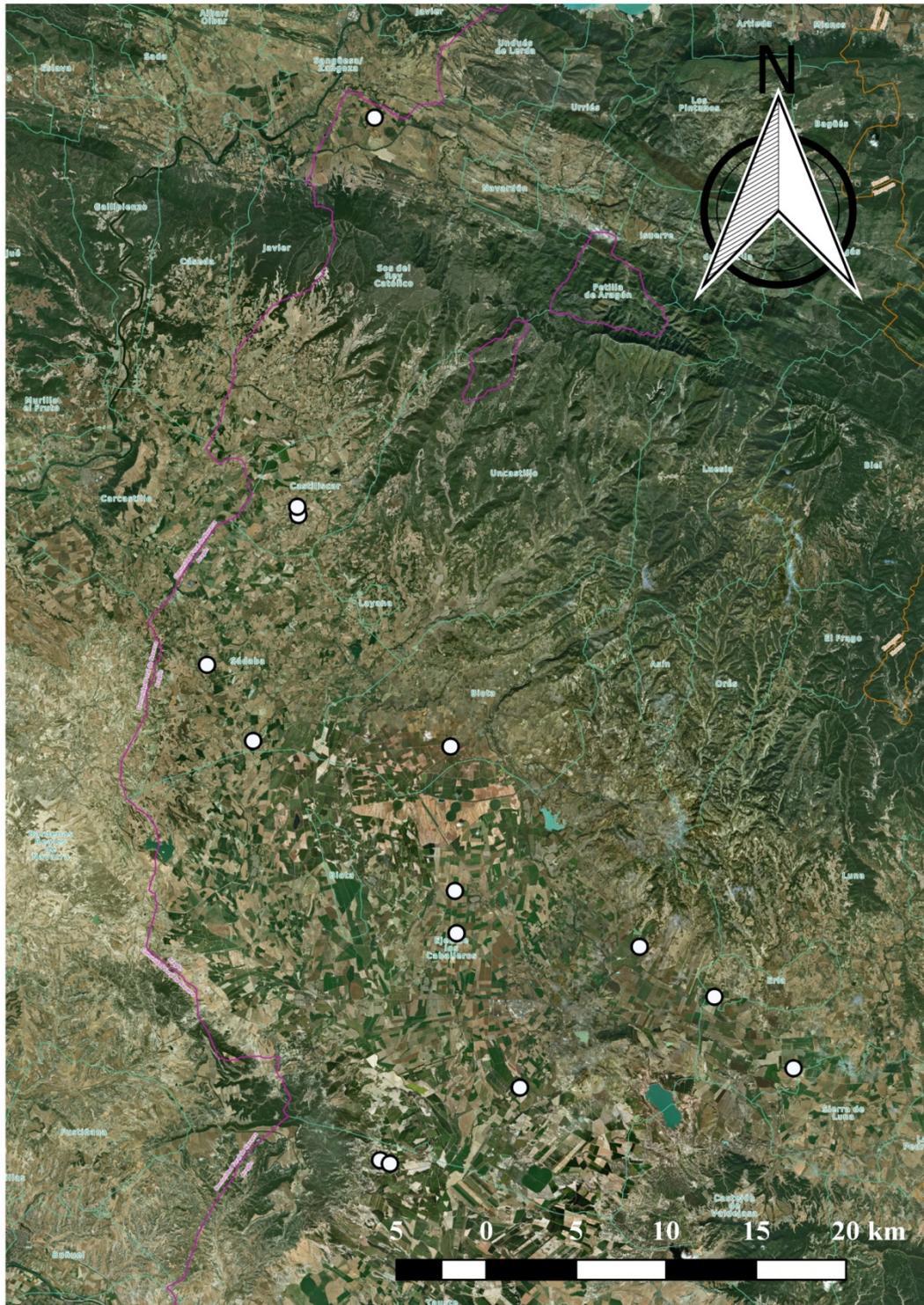


Figura 6. Ubicación de los equipos instalados en la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas



Figura 7. Ubicación de los equipos instalados en la Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza

2.4.3. Descripción de los equipos

Como se observa en las tablas-resumen de cada equipo, no todos los equipos instalados fueron iguales. A continuación, se detallan las diferentes sondas que portaban los equipos utilizados en el proyecto y sus características principales.

La sonda 10HS es una sonda de humedad de suelo que determina la constante dieléctrica o permitividad del suelo para calcular su contenido de humedad.



Figura 8. Decagon 10 HS soil moisture sensor

La Sonda 5TE mide la humedad del suelo, la temperatura y la conductividad eléctrica (CE), medidas que son imprescindibles en numerosos estudios de campo y por descontado en las condiciones de cultivo reales.



Figura 9. Decagon 10 HS soil moisture sensor

Estos dos tipos de sensores se pueden colocar a diferentes profundidades. En este caso se optó por profundidades de 20 y/o 40 cm.

La Sentek Drill & Drop es una sonda de medición de suelo totalmente encapsulada. Consta de varios sensores para medir la humedad del suelo, la salinidad y la temperatura a intervalos de 10 cm a lo largo de la sonda. La empleada en este estudio tiene 6 sensores y, por tanto, mide en una profundidad de 60 cm.



Figura 10. Sentek Drill & Drop

El sensor MPS-6 es un sensor de potencial de hídrico del suelo que proporciona lecturas, a largo plazo y sin necesidad de mantenimiento, del potencial de agua en el suelo y la temperatura a cualquier profundidad y sin verse afectado por la salinidad.



Figura 11. Decagon MPS-6 calibrated water potential sensor

Aparte de estos sensores, se han instalado dos estaciones meteorológicas (una en cada comunidad de regantes), como ya se ha indicado en la sección 2.2.



Figura 12. Estación meteorológica iMETOS

Estos equipos se han instalado con el objetivo de poder comparar los datos recogidos *in situ* en las parcelas del proyecto con los de la estación meteorológica más cercana.

2.5. Metodología

En este proyecto se han utilizado dos herramientas con el mismo objetivo: las sondas de humedad y la teledetección. Como los pasos que se han seguido para utilizar cada una de ellas son diferentes, se van a desarrollar cada uno por separado.

2.5.1. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante sensores

Como se ha indicado anteriormente, uno de los primeros pasos que se dieron en este proyecto fue la toma de muestras de suelo. Tras la espera y recepción de los resultados de los análisis, éstos fueron interpretarlos y utilizados para obtener los datos pertinentes, que posteriormente han resultado de gran utilidad en el desarrollo del proyecto.

El porcentaje de materia orgánica de las muestra de suelo, así como la textura del terreno, han sido los datos de partida. Estos valores se han introducido en el programa "Soil Water Characteristics" (Saxton & Rawls, 2006). Esta herramienta *software* estima la capacidad del agua del suelo, la conductividad y la retención de agua en función de la textura del suelo, la materia orgánica, el contenido de grava, la salinidad y la compactación. En la siguiente imagen se muestra una vista previa del programa.

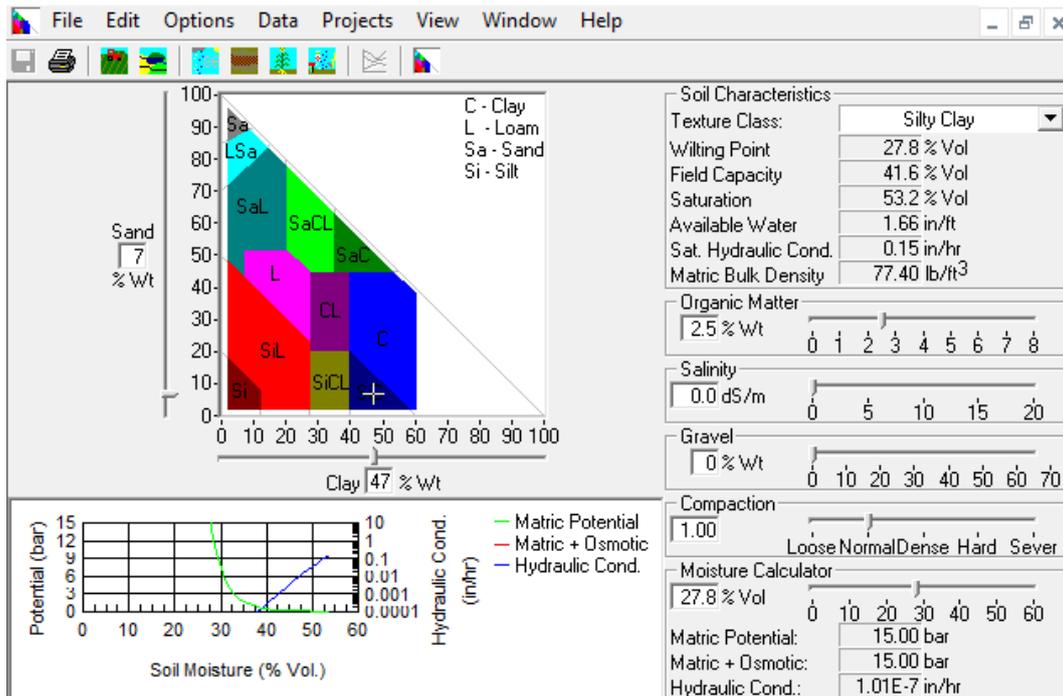


Figura 13. Vista previa del software Soil Water Characteristics (Saxton & Rawls, 2006)

De este modo, se estimaron los valores de capacidad de campo (*Field Capacity*), punto de marchitez (*Wilting Point*) y saturación (*Saturation*). Puesto que en el análisis de suelo de cada parcela ya se habían calculado estos valores, fue posible cotejar los valores experimentales y estimados, comprobando la bondad de los datos.

Partiendo de esta información, se puede conocer el punto de recarga (a partir del cual se debería regar para que la humedad del terreno no disminuya más y provoque pérdidas de rendimiento en el cultivo). Esto servirá para establecer, como se explica más adelante, el rango en que debe encontrarse la humedad del terreno a lo largo de la campaña de riegos.

El siguiente paso fue empezar a regar y comprobar que todos los equipos estaban funcionando correctamente, confirmando el correcto envío de las lecturas en los periodos de tiempo previamente establecidos.

Los datos son enviados por cada uno de los equipos a una plataforma (*Field Climate*) donde el usuario puede seleccionar el equipo y los datos concretos que quiere ver en ese momento. A modo de ejemplo, se muestra un gráfico de cómo evoluciona la humedad del suelo con el paso del tiempo, en función del tipo de terreno y de la sonda que va instalada en cada equipo. En este caso se trata del equipo número 6, instalado en el municipio de Biota en un pívot de maíz.

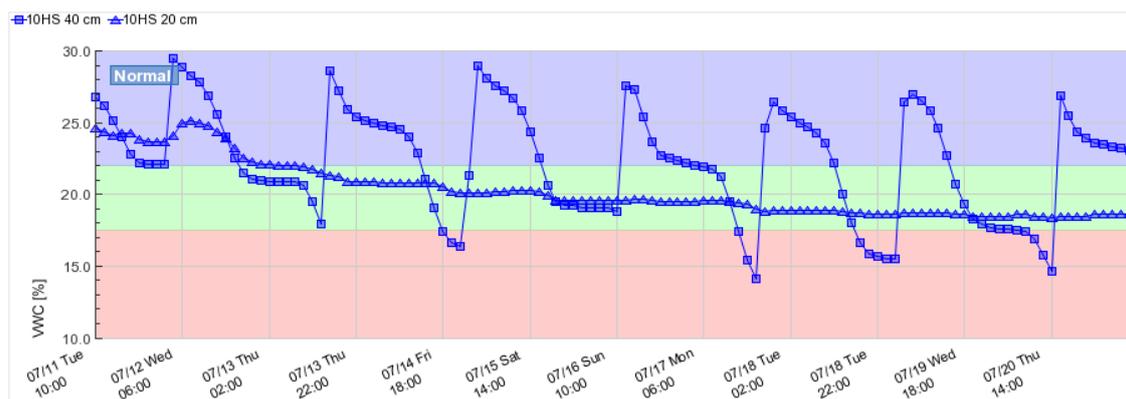


Figura 14. Gráfico de evolución de la humedad del suelo (Equipo nº 6)

Con las sondas se obtienen datos de humedad del suelo, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y punto de recarga (fijado por el usuario), de manera que nunca se alcance el PMP. El dato de CC nos informará del momento a partir del cual el suelo ya no retendrá más agua y por tanto nuestro riego se debe detener. Por otro lado, la cantidad de agua disponible en el suelo (CRAD) es la diferencia entre CC y PMP y se corresponde con la cantidad de agua que es aprovechable por la planta.

Como se puede observar en la imagen, se han establecido tres zonas para cada equipo. La zona de color rojo en la parte inferior representa el límite antes del cual deberíamos regar para no causar estrés a la planta (punto de recarga). En este caso vemos que el valor del punto de recarga es 17.5%, calculado como una media entre el PMP y la CC medidas a partir de la lectura de las sondas. La zona de color verde es la que se encuentra entre el punto de recarga y CC. Es la "zona ideal" en la que se debería encontrarse el valor de humedad del campo para cumplir con las necesidades hídricas que demande el cultivo. Y, por último, la zona de color azul representa el exceso de agua, límite por encima del cual el agua que estamos aportando al suelo se está perdiendo (normalmente por lixiviación), ya que es agua gravitacional.

Para llevar a cabo una buena gestión del agua de riego, que es el objetivo principal de este proyecto, es fundamental conocer cuáles son las necesidades hídricas teóricas de cada uno de los cultivos que involucrado. A fin de que el estudio sea lo más realista posible, se han empleado las necesidades hídricas teóricas del cultivo que proporciona la Oficina del Regante, por ser la información a la que tienen más fácil acceso los agricultores de la zona. Es preciso tener presente que se trata de una estimación teórica y que, por lo tanto, no es posible basar nuestras recomendaciones de riego solamente en esos datos.

Para ello, se introdujeron en la página de SiAR (<http://eportal.mapama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>) cada uno de los cultivos de cada zona y las fechas más importantes del ciclo (nascencia, floración, maduración, recolección...), con los que la plataforma calcula directamente las necesidades hídricas. El funcionamiento a través de la aplicación para móvil (SiAR app) sería muy similar.

Conociendo estos datos y el agua que consume realmente cada agricultor en su parcela es posible obtener una primera valoración del grado de eficiencia, que después se verá cuantificada a partir de las lecturas que obtenidas con las sondas instaladas en campo.

En el caso de Mequinenza, se tuvo acceso directo a los consumos de agua diarios de cada una de las parcelas en las que se instalaron los equipos, pues la Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza tiene informatizada toda la información de sus regantes. Se realizó una primera comparativa entre el consumo real de agua de riego (m^3/ha) facilitado por la comunidad de regantes y el dato de necesidades teóricas de riego en esas fechas estimado por la Oficina del Regante.

Por otro lado, en la zona de Bárdenas no se disponía de esta información. En este caso se estimaron los consumos conociendo el sistema de riego y las horas de riego que cada uno de los agricultores aplicaba a su cultivo.

A partir de este punto se llevó a cabo un seguimiento durante toda la campaña con el objetivo de comprobar que todas las sondas funcionaran correctamente.

2.5.2. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante teledetección

En paralelo con la recogida de datos a través de los sensores de humedad, y en lo que respecta al enfoque basado en teledetección, se seleccionó, de cara a la redacción de la memoria, una parcela de cada Comunidad de Regantes participante para ejemplificar el proceso llevado a cabo.

De entre los índices de vegetación disponibles en la bibliografía para la estimación de la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación (en función de cómo la cubierta vegetal absorbe la radiación solar fotosintéticamente activa), recogidos, por ejemplo, en la revisión de Xue and Su (2017), se ha optado por el índice NDVI. Esta elección no se fundamenta sólo en que es la opción más utilizada, sino –como se explica más adelante– también en la disponibilidad de herramientas de fácil acceso y manejo que pueden ser de interés para los agricultores involucrados en el proyecto.

El índice NDVI se obtiene de forma robusta, simple y directa desde las imágenes multiespectrales mediante una combinación algebraica de las reflectividades en el rojo e infrarrojo cercano:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{VIS}}{\text{NIR} + \text{VIS}}$$

es decir, mediante la diferencia entre la reflectancia de las bandas 4 (infrarrojo cercano) y 3 (visible – rojo) dividido por la suma de estas dos bandas de reflectancia. A modo de referencia, un valor de 0,13 correspondería a suelo desnudo y 0,91 a la máxima cobertura verde.

Para llevar a cabo esta parte del proyecto, se ha utilizado una herramienta denominada SPIDERwebGIS, desarrollado por el Grupo de Teledetección y SIG del Instituto de Desarrollo Regional Universidad de Castilla-La Mancha. SPIDERwebGIS permite obtener el índice NDVI directamente de la página web de la empresa Agrisat Iberia (<https://www.agrisat.es/>). Mediante este *software*, tenemos acceso a las imágenes de satélite de cada una de las parcelas que forman parte de proyecto (en las cuales tenemos instalados los equipos).

El procedimiento es el siguiente: se selecciona una de nuestras parcelas objeto de estudio y un rango de fechas concretas para ver las imágenes captadas por el satélite. A continuación,

una vez la herramienta muestra la imagen en cuestión, se pueden seleccionar varios puntos de la parcela de los cuales devuelve los valores del NDVI (para ese punto concreto y esa fecha). Aparte de esto, se puede ver en un gráfico la evolución del índice de NDVI de cada punto en ese rango de fechas y los valores resumidos en una tabla (Figura 15).

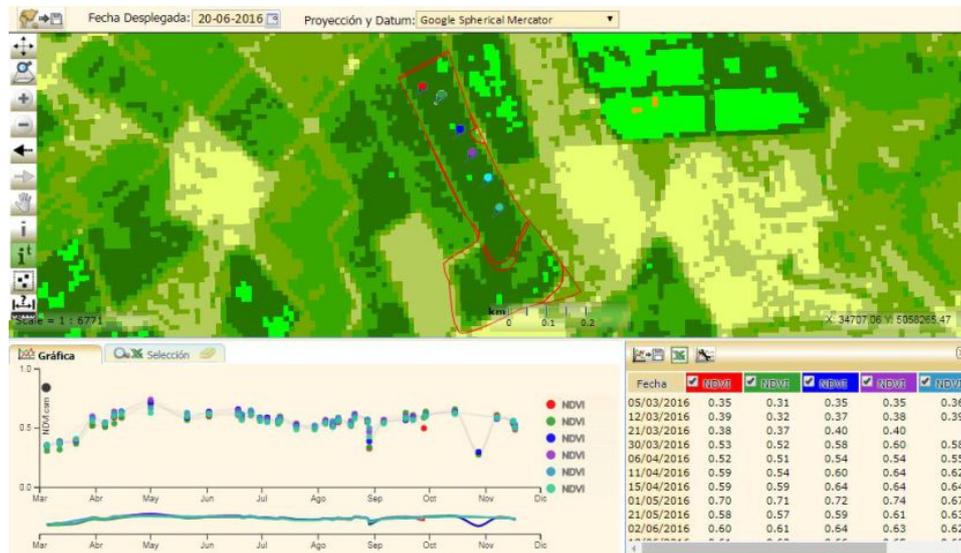


Figura 15. Vista previa de la plataforma SPIDERwebGIS (gráfico y valores de NDVI de la parcela estudio)

Por otra parte, en la publicación nº 56 del estudio de la FAO de Riego y Drenaje se expone el método de cálculo de Penman-Monteith, un método preciso para estimar la evapotranspiración de referencia (ET₀) diaria (mm/día). Se utiliza el término del coeficiente de cultivo (K_c), para determinar las necesidades hídricas de un cultivo determinado. Este coeficiente sirve como una integración de todas las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos, y es el resultado del cociente entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) representando los aspectos que diferencian a un cultivo determinado respecto al prado de referencia.

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c$$

Por otro lado, la formulación más avanzada del procedimiento FAO-56 incorpora al tradicional uso de coeficiente de cultivo “único” K_c el denominado coeficiente de cultivo “dual”, el cual permite acercarnos a la estimación de la evapotranspiración como suma por un lado de la transpiración, o flujo de agua a través de la planta, y por otro de la evaporación desde la fracción de suelo desnuda. Para ello se introduce el coeficiente de cultivo basal, K_{cb}, como el cociente entre la transpiración de una cubierta en ausencia de estrés y la evapotranspiración de referencia.

$$ET = K_s \cdot K_{cb} \cdot ET_0 + K_e \cdot ET_0 \text{ (donde } K_s = 1, \text{ en condiciones de ausencia de estrés hídrico)}$$

$$ET = K_{cb} \cdot ET_0 \text{ (si ignoramos la componente evaporativa del suelo)}$$

Aplicación a cultivos herbáceos

Este es el caso de la Comunidad General de Regantes de Bárdenas.

La ecuación que se propone para la relación entre el coeficiente de cultivo K_c y el NDVI ha sido ampliamente validada en cultivos herbáceos como trigo, cebada, maíz, algodón, girasol, etc., que en su fase de máximo desarrollo alcanzan cobertura completa, suponiendo un manejo estándar para sistemas de riego de aspersión:

$$K_c = 1,25 \cdot \text{NDVI} + 0,1$$

Para el establecimiento del cultivo después de siembra, en su fase inicial de nascencia, la relación anterior puede infraestimar el valor requerido del K_c , pues en estos casos el comportamiento evaporativo del suelo desnudo es muy dominante. En esta fase suelen ser necesarios riegos frecuentes para garantizar la nascencia e implantación, tal y como se describe en FAO-56.

Ocurre de forma semejante para cultivos que en su fase de máximo desarrollo no alcanzan cubierta completa, con lo que el porcentaje de suelo desnudo es elevado, como puede suceder en los casos de ajos, cebollas, y otros hortícolas, que además suelen requerir riegos frecuentes y cortos dado que tienen sistemas radiculares de escasa profundidad y requieren mantener elevados contenidos de agua en el suelo explorado por las raíces, pues son muy sensibles a la escasez de agua. Adicionalmente, es necesario también diferenciar si el sistema de riego moja o no completamente el suelo.

En general, cuando la fracción de suelo desnudo es importante, suele ser preferible utilizar la formulación coeficiente dual y modelar así de forma independiente la evaporación del suelo desnudo de la componente de transpiración, lo que además permite tener en cuenta el sistema de riego y, por tanto, la superficie mojada de forma efectiva.

Aplicación a cultivos leñosos

Este sería el caso para la Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza.

Los cultivos leñosos se diferencian de los cultivos herbáceos fundamentalmente en que sus sistemas radiculares son capaces de explorar volúmenes de suelo mayores que en el caso de cultivos anuales, siendo en muchos casos la fracción de suelo desnudo mucho mayor.

El papel del almacenamiento del agua en suelo es pues muy relevante, pues la planta es capaz de utilizar el agua recogida en estaciones anteriores a la de crecimiento. La transpiración máxima de la cubierta actual de los cultivos leñosos bajo unas determinadas condiciones de demanda atmosférica puede ser calculada directamente desde el coeficiente de cultivo basal y la ET_0 . Este valor permite aproximar de forma sencilla y directa al valor de las necesidades netas de agua de riego, respondiendo pues a la pregunta de cuánto regar:

$$ET = K_s \cdot K_{cb} \cdot ET_0 + K_e \cdot ET_0$$

Para calcular las necesidades brutas es necesario tener en cuenta la eficiencia y uniformidad del sistema de riego, incluyendo la evaporación desde la superficie del suelo, lo

que a su vez depende de la superficie de la zona mojada y frecuencia de riego. Para un sistema de riego por goteo usual y con un riego semanal, el componente evaporativo K_e se estima en 0,05 y se aplicarán las siguientes relaciones.

$$K_{cb} = 1,44 \cdot NDVI - 0,1$$

donde K_{cb} es el coeficiente de cultivo basal, con valores que oscilan entre 0,15 y 1,15.

La ecuación anterior permite obtener valores de K_{cb} desde una imagen en la que se ha calculado el valor del NDVI para cada pixel y asignarlos a los distintos puntos de una parcela. Además, puede obtenerse la evolución temporal del coeficiente K_{cb} si se cuenta con una serie temporal de imágenes. La secuencia de imágenes permite pues describir la evolución de la cubierta vegetal, atendiendo a sus características específicas de siembra y crecimiento y muestra la variabilidad espacial y temporal que los distintos factores de suelo y manejo pueden introducir.

En las parcelas monitorizadas se pretende evaluar la fiabilidad de la ecuación señalada más arriba, así como identificar diferencias respecto a la K_c obtenida por medio de las recomendaciones de la Oficina del Regante.

El objetivo de esta parte del Proyecto es identificar si la determinación de la K_c/K_{cb} por teledetección de superficies concretas de las parcelas permite ser más eficientes con las dosis de riego aplicadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de suelo e interpretación de los mismos

No existieron grandes disparidades entre las muestras objeto de estudio, ya que las tierras que se analizaron presentaban características similares.

En lo que respecta a la textura de los suelos, se encontraron suelos generalmente francos en la Comunidad General de Regantes de Bárdenas, y franco-arcillosos en la Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza. Esto se ve reflejado posteriormente en aspectos como la capacidad de retención de agua de las diferentes parcelas.

El porcentaje de materia orgánica en estos suelos fue cercano al 2%, considerándose un valor medio, y en general los suelos fueron no salinos, con valores $<0,4$ dS/m.

La información proporcionada por los análisis fue de gran utilidad en campo, cara a la instalación de los diferentes sensores utilizados en el Proyecto.

3.2. Datos climáticos

En el periodo de estudio no hubo temperaturas ni precipitaciones excepcionales.

Las dos estaciones meteorológicas instaladas en las comunidades de regantes permitieron un seguimiento diario y detallado de la climatología en cada zona. La información recogida, en especial la referente a precipitaciones, permitió ajustar las planificaciones de riego.

3.2.1. Comunidad General de Regantes de Bárdenas

Para el mes de julio, el más caluroso, se registró una temperatura del aire mínima de $11,2$ °C y una máxima de 35 °C.

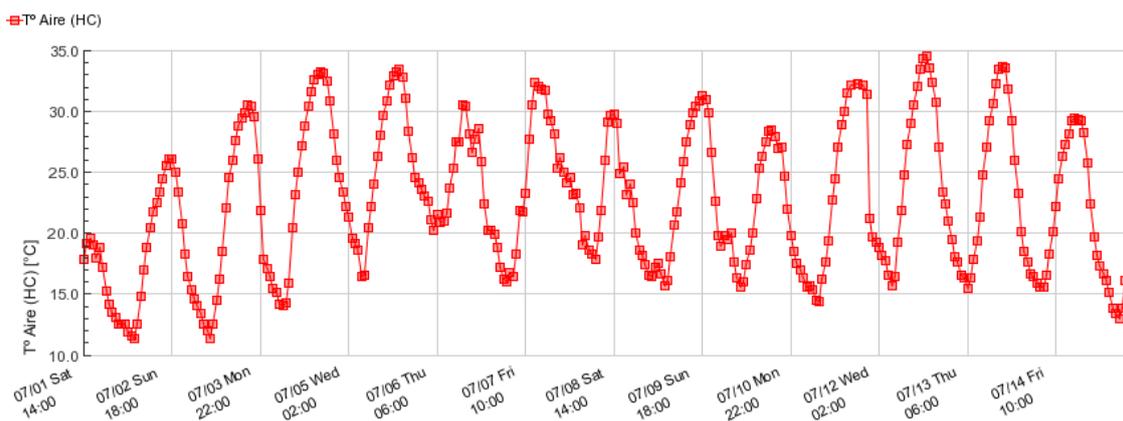


Figura 16. Gráfico de temperaturas del mes de julio de 2017. Datos obtenidos por la estación meteorológica iMetos instalada en parcela (Equipo nº 17)

En cuanto a las precipitaciones, solo se recogieron $2,4$ mm a lo largo del mes.

3.2.2. Comunidad de Regantes APAC de Mequinzenza

Los valores extremos de temperatura para el mismo periodo de tiempo (julio) fueron, en el caso de Mequinzenza, de 12,6 °C y 37,2 °C. Por tanto, las diferencias no fueron significativas entre las dos zonas de estudio.

En lo que respecta a las precipitaciones, fueron más abundantes (14,6 mm). Las precipitaciones en esta época del año, sobre todo en forma de tormenta, pueden conllevar modificaciones en la planificación de riegos. En este aspecto sí hubo diferencias significativas entre las dos zonas.

3.3. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante sensores

La gran cantidad de sensores instalados reportaron, evidentemente, muchos datos de interés. La respuesta de los diferentes tipos de equipos repartidos en ambas zonas fue en general muy positiva. Inicialmente hubo algún problema con algún equipo (uno dejó de estar operativo debido al ataque de un jabalí y otro debido al contacto con un apero de labranza), pero se pudieron volver a reinstalar de inmediato sin consecuencias para el estudio.

A continuación, se recogen los datos más representativos obtenidos dentro de cada Comunidad de Regantes:

3.3.1. Comunidad General de Regantes de Bárdenas

Caso a:

- Equipo: Equipo nº 1
- Situación: Término municipal de Ejea de los Caballeros, Zaragoza
- Cultivo: Maíz temprano (siembra a principio de abril)
- Sistema de riego: Cobertura (15 m × 18 m)
- Sondas: Sentek Drill and Drope

El gráfico de humedad de ese terreno para el mes de junio es el siguiente (Figura 17):

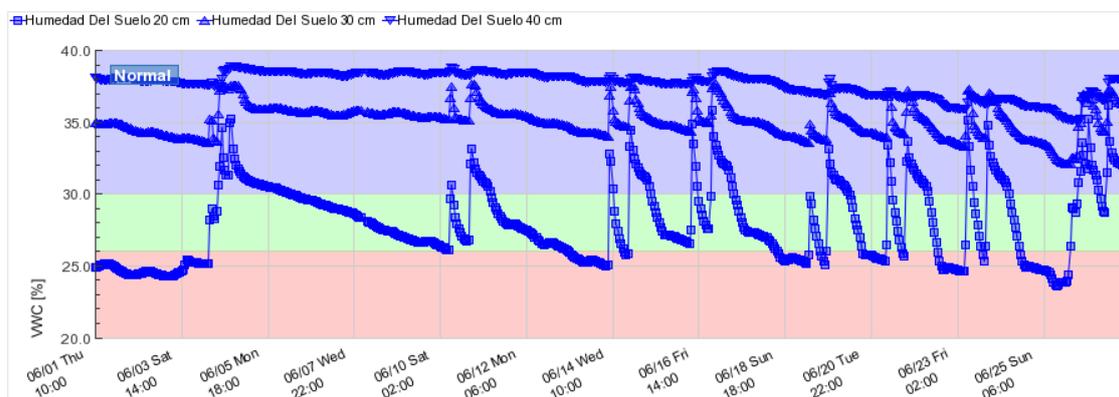


Figura 17. Gráfico de la humedad del terreno. Datos obtenidos por la sonda Sentek Drill and Drope a profundidades de 20, 30 y 40 cm (Equipo nº 1)

Las sondas de humedad instaladas permitieron obtener información de humedad, temperatura y salinidad cada 10 cm en una profundidad de 60 cm. No obstante, como vemos en el gráfico anterior, se han seleccionado las sondas de 20, 30 y 40 cm a efectos de visualización por ser las más representativas.

Respeto a la climatología, es preciso resaltar que en toda la zona hubo tormentas entre el 4 y 8 de junio (de 30 l/m² aprox. cada una, aunque varió de unas zonas a otras) y también el 24 y 25 de junio (éstas de pluviometría más modesta, unos 17 l/m²).

En la gráfica se observan los aumentos de humedad en los eventos de lluvia y también asociados con los riegos que se llevan a cabo cada 2-3 días, organizados en dos turnos de 1,5 horas.

Con esta planificación, el aporte de agua medio es de 9 horas, con una pluviometría del aspersor de 7 mm/h, lo que supone 63 mm/semana.

Según la tabla de la red SIAR, las necesidades hídricas máximas del cultivo (46,6 mm) serían inferiores al riego aportado (63 mm).

<i>FECHA</i>	<i>K_c (SIAR)</i>	<i>ET₀ (mm)</i>
<i>Del 29/05/2017 al 04/06/2017</i>	<i>0,8</i>	<i>30,6</i>
<i>Del 05/06/2017 al 11/06/2017</i>	<i>0,9</i>	<i>44,3</i>
<i>Del 12/06/2017 al 18/06/2017</i>	<i>0,9</i>	<i>53,6</i>
<i>Del 19/06/2017 al 25/06/2017</i>	<i>0,9</i>	<i>48,3</i>
<i>Del 26/06/2017 al 02/07/2017</i>	<i>0,9</i>	<i>34,3</i>

Tabla 2. Necesidades hídricas del cultivo del maíz para el mes de junio en la zona de Ejea de los Caballeros. Datos obtenidos de la red SIAR.

Las lecturas de la sonda de humedad a 20 cm indicaron que, a pesar de las dosis aplicadas, el suelo no fue capaz de retener toda el agua. Con el paso de los días no se mantuvo la humedad para no pasar del punto de recarga o PR (el suelo no retiene todo el agua y la demanda por parte del cultivo es alta).

Las otras dos sondas indicaron que el perfil del suelo estaba cerca del punto de saturación en los perfiles más profundos, aspecto que podría deberse a que se aplican dosis altas de riego para compensar los intervalos de riego de 2-3 días.

Con estos primeros resultados, se evidencia que las sondas son de utilidad: aun aportando más cantidad de agua de la recomendada por la red SIAR, no se estaban cubriendo las necesidades del cultivo. Esto abre la posibilidad de modificar la gestión del riego de la parcela. Es preciso insistir en la importancia de la capacidad de retención de agua, en función de la textura del terreno, para un correcto manejo hídrico del mismo.

Los datos obtenidos en proyecto evidenciaron una gran heterogeneidad dentro de cada Comunidad de Regantes en cuanto a sistemas de riego y tipos de suelo.

Caso b:

- Equipo: Equipo nº 6
- Situación: Biota, Zaragoza
- Cultivo: Maíz
- Sistema de riego: Pívor
- Sondas: Si bien inicialmente estaba previsto instalar una sonda de 60 cm de Sentek del tipo Drill and Drop como la del caso a, la presencia de un estrato de roca muy duro a unos 40 cm aconsejó la instalación de dos sondas 10 HS a 20 cm de profundidad en su lugar. En la siguiente imagen se puede ver cómo quedó instalado el equipo en las proximidades del pívor.



Figura 18. Equipo nº 6 instalado en las proximidades del pívor sobre cultivo de maíz (Elaboración propia)

Los resultados de las lecturas de las sondas se muestran en el siguiente gráfico (Figura 19). Se aprecia un aumento de la humedad a principios del mes, del 3 al 5 de junio, debido a las precipitaciones. Posteriormente se observa una disminución de la humedad, ya que no se aportó ningún riego hasta el día 9. A pesar del riego aportado, se observa una tendencia a la baja hasta llegar a humedades inferiores al PR a mediados de mes.

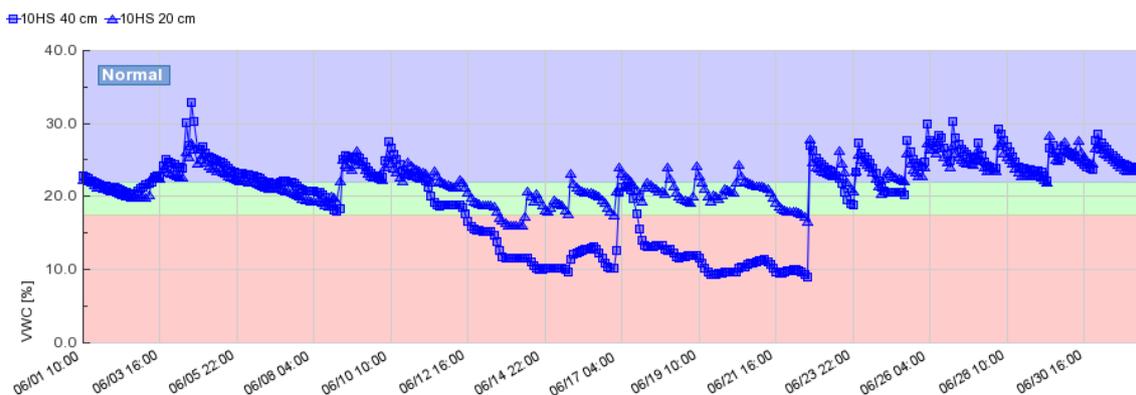


Figura 19. Evolución de la humedad del terreno. Datos obtenidos por las sondas 10 HS (Equipo nº 6)

Como consecuencia de la decisión del agricultor de aumentar las dosis de riego el día 15, la gráfica de la sonda a 20 cm (la superior en la figura) muestra que la humedad se mantuvo entre PR y CC hasta que la combinación de las aportaciones de agua, tanto de lluvia como de riego, llevó a que se superase el punto de CC a finales de mes (ya que la última semana de junio llovieron unos 30 mm).

Según el agricultor, los incrementos de dosis de riego en este mes fueron los siguientes:

- 1ª semana: 30 l/m²
- 2ª semana: 35 l/m²
- 3ª y 4ª semana: 50 l/m²

En esta parcela se puede ver claramente que existe una relación causa-efecto en el comportamiento de la humedad del suelo como consecuencia del manejo del riego, y como a partir de un incremento de la dosis de riego se pudo corregir la tendencia a la baja a partir de la 3ª semana, cuando se empezaron a aplicar 50 l/m².

Por otro lado, el aumento de las dosis de riego conjuntamente con las lluvias que aportaron las tormentas de final de mes llevaron a la situación opuesta, es decir, a un exceso de agua en el perfil del suelo que mantuvo la humedad por encima de CC. Procede, pues, un ajuste a la baja de la dosis de riego.

Caso c:

- Equipo: Equipo nº 5
- Situación: Sádaba, Zaragoza.
- Cultivo: Alfalfa
- Sistema de riego: Cobertura (18 m × 15 m)
- Sondas: 2 sondas 10HS a la misma profundidad (20 cm)

En este caso, la gestión del riego se realizaba de la siguiente forma: el tiempo de riego fue de 60 min/sector. La parcela constaba de 4 sectores de riego. Se llevaban a cabo riegos de 36 horas seguidas y se descansaban 10 días. Conociendo las características del sistema de riego, se estima que se aplicaban unos 6,5 mm/hora. Es decir, se aplicaban 9 turnos de riego de 6,5 mm, que suponen 58,5 mm en 11,5 días (159 mm/mes).

Las necesidades de riego según la red SIAR para el mes de junio fueron de 123 mm, por lo que estaba algo por encima de las necesidades teóricas.

En la Figura 20 se recogen las lecturas de las sondas instaladas en esta parcela.

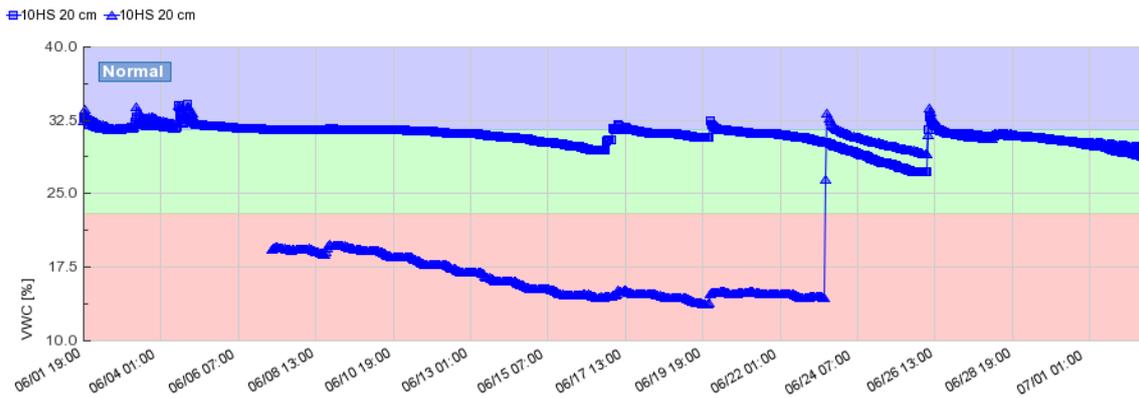


Figura 20. Evolución de la humedad del suelo. Datos obtenidos por las sondas 10HS (Equipo nº 5)

Cara a la interpretación del gráfico, es preciso hacer algunas aclaraciones: una de las sondas de humedad (la que vemos por debajo) dejó de funcionar como resultado de que probablemente un jabalí (u otro animal) la sacó de donde había quedado instalada. La sonda fue reinstalada de manera provisional (del día 8 al día 23), pero las lecturas fueron inferiores a las de la sonda que envió información desde el principio de forma ininterrumpida. El día 23 de junio la sonda se reinstaló correctamente y se aprecia que sus lecturas volvieron a coincidir con las de la otra sonda. Esta incidencia pone en evidencia la importancia de una correcta instalación en el terreno, pues de lo contrario puede facilitar información que no es real (con lecturas inferiores a las reales) y la importancia de la redundancia de equipos en ensayos de campo.

En este caso, y con las sondas funcionando correctamente, la humedad del suelo se mantuvo entre los umbrales de CC y PR. Ahora bien, al tender la humedad a estar en la zona de CC o por encima, es previsible que haya ciertas pérdidas por percolación.

3.3.2. Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza

Caso a:

- Equipo: Equipo nº 7
- Situación: Mequinenza, Zaragoza
- Cultivo: Almendro (variedad velona)
- Sistema de riego: Goteo
- Sondass: 2 sondas 10HS (a 20 y 40 cm)

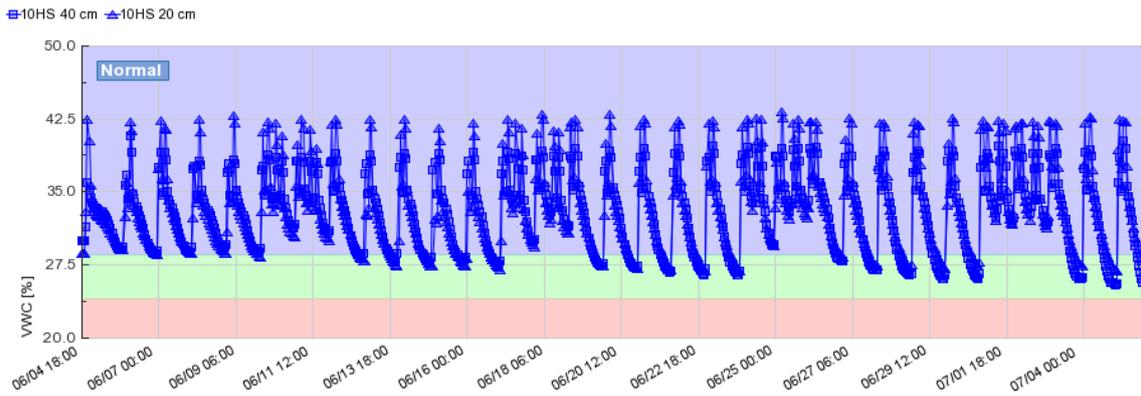


Figura 21. Evolución de la humedad del terreno. Datos obtenidos por las sondas 10HS (Equipo n° 7)

En este caso se cambia de zona, de cultivo, de tipo de terreno y de sistema de riego.

La interpretación del gráfico de la Figura 21 es inmediata: se trata de un caso de derroche de agua. Se aprecia claramente que la periodicidad y duración de los riegos es excesiva. El poder ver lo que pasa con el agua que aportamos al cultivo, permite al agricultor actuar y poner soluciones casi de forma inmediata, cara a próximos días de riego y próximas campañas.

Aparte de esto, gracias a la gran cantidad de información aportada por los sensores instalados, se puede relacionar de forma directa la variación de la humedad en el terreno con la temperatura del aire y las precipitaciones en dicha zona. Los gráficos que vemos a continuación (Figura 22, Figura 23 y Figura 24) corresponden al mismo equipo (n° 7) para el mes de julio de 2017.

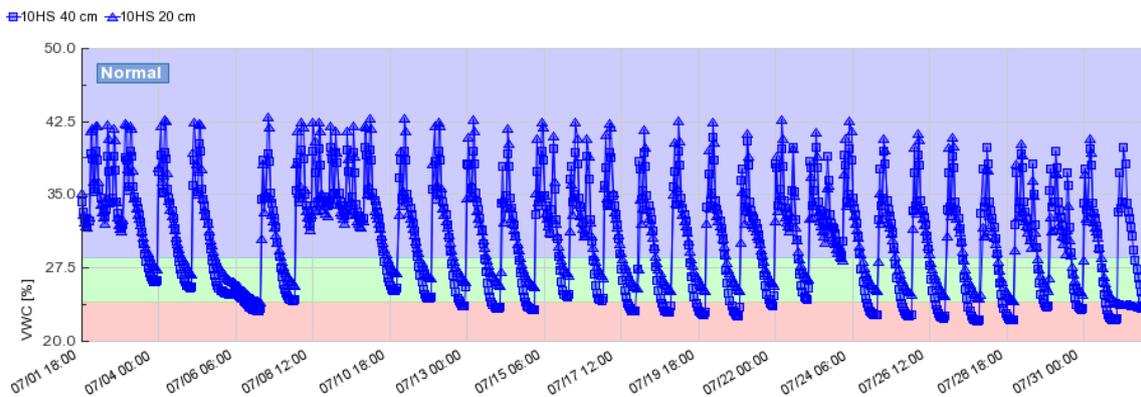


Figura 22. Evolución de la humedad del terreno. Datos obtenidos por las sondas 10HS (Equipo n° 7)

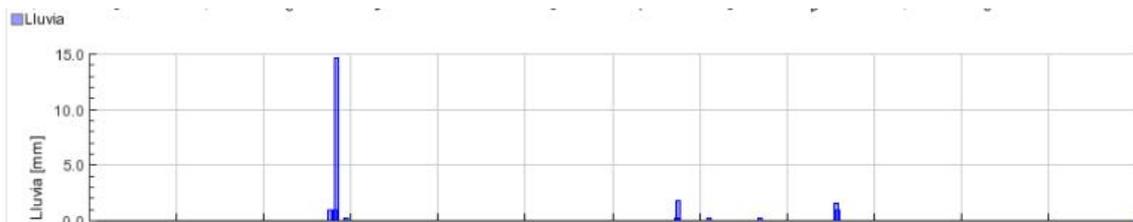


Figura 23. Evolución de las precipitaciones para el mes de julio de 2017. Datos obtenidos con el equipo n° 7

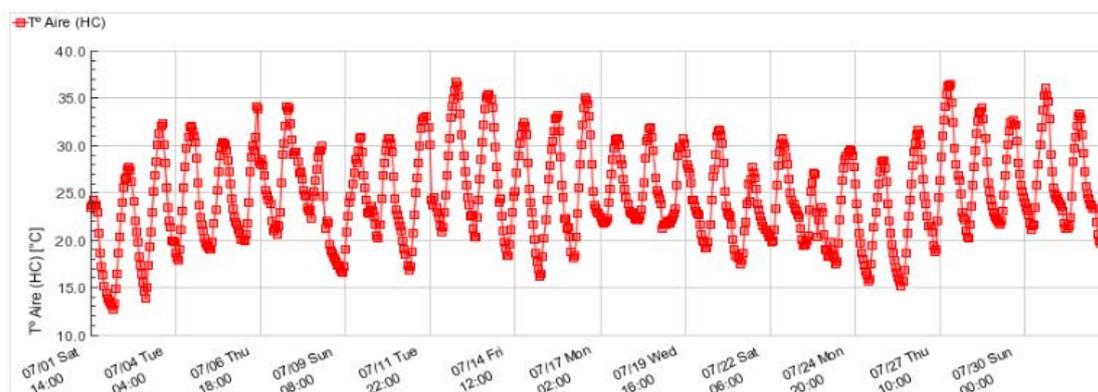


Figura 24. Evolución de la temperatura del aire para el mes de julio de 2017. Datos obtenidos por el equipo nº 7

De la observación de los tres gráficos en conjunto se puede deducir una clara correlación entre la bajada de temperaturas, la precipitación puntual y la variación en la retención de la humedad en el terreno (días 8-10 de julio). Con esto podemos cerciorarnos de que tenemos más herramientas, todas ellas aportadas por los sensores, para intentar mejorar la gestión de los riegos en cualquier cultivo.

Caso b:

- Equipo: Equipo nº 19
- Situación: Mequinenza, Zaragoza
- Cultivo: Cerezo (variedad 484)
- Sistema de riego: Goteo
- Sondas: 1 sonda 5TE (a 35 cm) y 1 tensiómetro MPS6

En este caso, se trabajó con instrumento de medida diferente: el tensiómetro o sensor de potencial hídrico del suelo. Sólo se instaló uno en cada Comunidad de Regantes. El tensiómetro muestra el esfuerzo que han de realizar las raíces de la planta para extraer la humedad del suelo que requiere el cultivo.

En el gráfico que se muestra a continuación (Figura 25) se recogen los datos aportados por el tensiómetro y la sonda de humedad del equipo nº 19 para el mes de agosto. Interpretándolo, se observa que el agricultor dio riegos constantes al cerezo y que la humedad del suelo mantuvo la misma tendencia a lo largo del mes (siendo esta un poco superior a la capacidad de campo calculada para este terreno, por lo que tendríamos unas pequeñas pérdidas de agua).

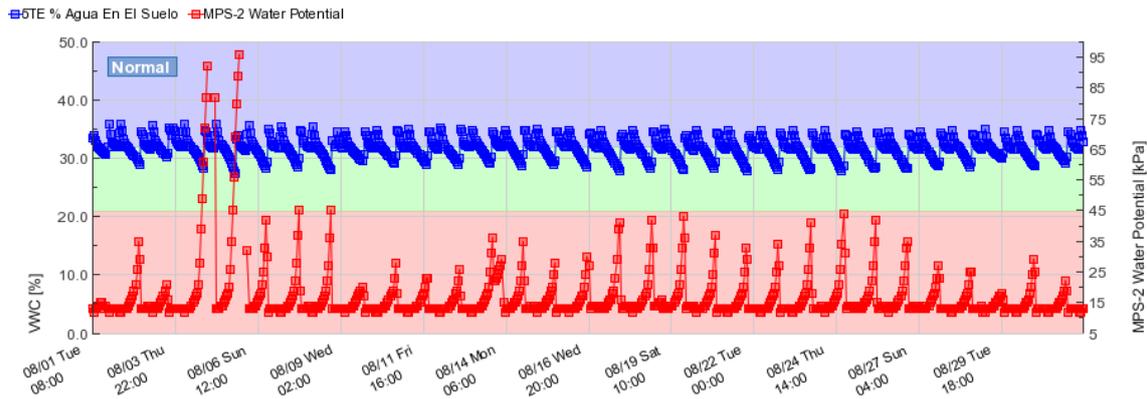


Figura 25. Evolución de la humedad del suelo (color azul) y potencial hídrico del suelo (color rojo) medido por el sensor 5TE y el tensiómetro MPS-2 respectivamente (Equipo nº 19)

En lo que respecta a los valores que envió el tensiómetro, cabe destacar dos picos durante los días 5 y 6 de agosto, indicando que son los días del mes en los cuales las plantas tuvieron que hacer un mayor esfuerzo para obtener el agua que necesitaban. Si se observa el gráfico de temperaturas de ese mes que nos muestra el sensor (Figura 26), observamos que hay una correlación directa entre el aumento de temperatura y los picos del tensiómetro. Por lo que podemos afirmar que esos días de temperaturas más altas, a las plantas les costó más extraer el agua del terreno.

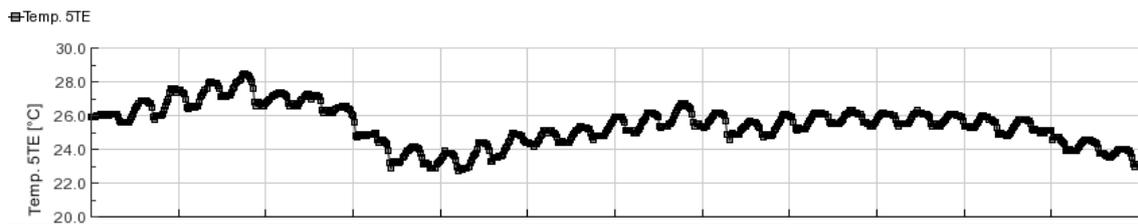


Figura 26. Evolución de la temperatura en la parcela donde está instalada el equipo nº 19. Datos obtenidos por la sonda 5TE del mismo equipo.

Con esto se puede ver que si se instalan tensiómetros a varias profundidades, lo mismo que se ha hecho con las sondas de humedad, se puede conocer el movimiento del agua a lo largo del perfil del suelo. Es un método exacto y sencillo, que también permite determinar el momento de aplicación del riego.

Caso c:

- Equipo: Equipo nº 18
- Situación: Mequinenza, Zaragoza
- Cultivo: Almendro (variedad Lauranne)
- Sistema de riego: Goteo
- Sondass: 2 sondas 10HS

Como se explicaba anteriormente, otra de las comparaciones que se han hecho con todos los equipos consiste en observar el consumo real de agua y compararlo con las necesidades teóricas de la red SIAR. En este caso se muestra que esto es de gran utilidad.

En el siguiente gráfico (Figura 27), podemos ver claramente que los fines de semana aumentan la dosis de riego del almendro. Esto es debido a que las tarifas de riego son más baratas, por lo que los agricultores aprovechan para aportar un poco más de agua al cultivo. Lo que hay que comprobar es si esa agua se pierde o si se está aprovechando en cada caso concreto.

También se ve claramente que a lo largo de todo el mes (exceptuando los fines de semana) las necesidades teóricas según la red SIAR son siempre superiores al aporte real de agua al cultivo. Los sensores de humedad instalados permiten comprobar si realmente habría sido necesario aportar más agua al cultivo o si con lo que se estaba aportando ya se cubrían las necesidades.

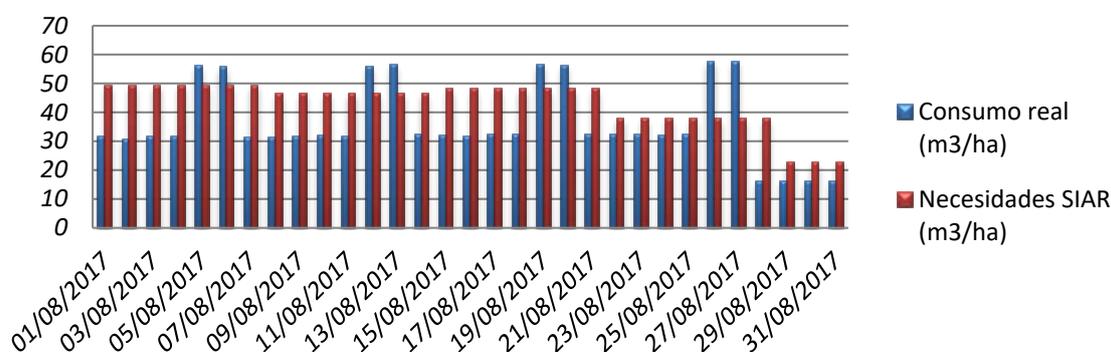


Figura 27. Gráfico comparativo del consumo de agua real en la parcela donde se encuentra el equipo nº 18 y las necesidades teóricas de la red SIAR (Elaboración propia)

Las lecturas de las sondas (Figura 28) revelaron que los aportes de agua que estaban dando entre semana hacían que la humedad bajara por debajo del punto de recarga (la planta empezaba a sufrir), y los aportes extra de los fines de semana eran los responsables de que la humedad se mantuviese siempre en la zona ideal (sobrepasándose la CC ligeramente).

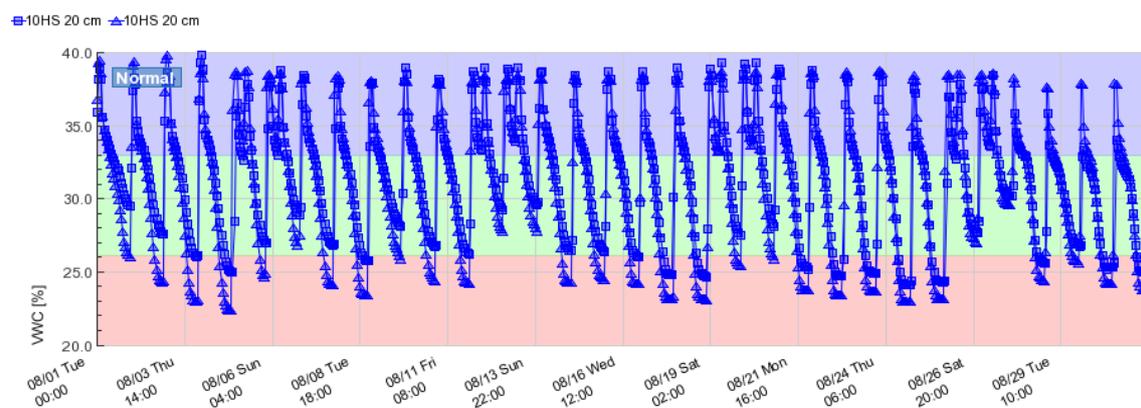


Figura 28. Evolución de la humedad del terreno medida por las sondas 10HS (Equipo nº18)

Con estos resultados se puede concluir que, para este caso concreto, las necesidades teóricas de la red SIAR para este cultivo eran muy acertadas y las lecturas de las sondas, de nuevo, aportaron información muy útil para una futura planificación de riegos que cumpla con las necesidades del cultivo en cuestión.

3.4. Monitorización del estado hídrico del suelo mediante teledetección

Una vez vistos los resultados obtenidos mediante las sondas de humedad, se pasa a resumir la información que nos proporcionó el uso de la teledetección en este estudio. Como se adelantaba más arriba, en lo que atañe a la teledetección, se ha empleado únicamente el índice NDVI, a partir del cual se ha estimado el coeficiente del cultivo (K_c).

Como en el caso de los sensores de humedad, sólo se presentarán los resultados más interesantes obtenidos con esta herramienta en cada Comunidad de Regantes.

3.4.1. Comunidad General de Regantes de Bárdenas

Caso a:

Se trata de una parcela cultivada con maíz en la Comunidad de Regantes nº V de la Comunidad General de Regantes del Canal de Bárdenas, concretamente en el término municipal de Ejea de los Caballeros. Es la parcela donde se situó el equipo nº 17, y el riego en este caso era por aspersión. Aparte de esto, en esta parcela se instaló la estación meteorológica para la zona de Bárdenas.

En este caso se ejemplifica el cálculo de la K_c para un cultivo herbáceo (maíz) a partir de los datos extraídos del SPIDERwebGIS, comparándolo con el obtenido a partir de los datos de la red SIAR. Las fechas escogidas son las más representativas del cultivo. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

FECHA	K_c (SIAR)	K_c (SPIDERwebGIS)
09/06/2017	0,53	0,39
14/06/2017	0,53	0,39
21/06/2017	0,53	0,34
28/06/2017	0,53	0,40
05/07/2017	0,53	0,44
12/07/2017	0,60	0,61
19/07/2017	0,70	0,76
26/07/2017	0,81	0,94
02/08/2017	0,91	1,02
09/08/2017	1,01	1,11
16/08/2017	1,10	1,03
23/08/2017	1,11	1,03
30/08/2017	1,11	1,04
06/09/2017	1,11	1,03
13/09/2017	1,11	1,09
20/09/2017	1,04	1,09
27/09/2017	0,83	1,07

Tabla 3. Evolución del coeficiente K_c del maíz cultivado en la parcela 52 del polígono 517 de Ejea de los Caballeros. Datos obtenidos de la red SIAR y de SPIDERwebGIS (Elaboración propia)

Se observa que en la primera parte del ciclo, la K_c calculada mediante la técnica de teledetección infravaloraba las necesidades, lo cual se justifica porque, en el establecimiento del cultivo después de siembra, en su fase inicial de nascencia, el comportamiento evaporativo del suelo desnudo es muy dominante. En la fase de máximo consumo las necesidades del cultivo coincidieron para los dos procedimientos de cálculo. En la última fase del cultivo fue donde aparecieron más diferencias: la K_c calculada según la red SIAR empezó a disminuir desde el 12 de agosto, mientras que en la calculada con SPIDERwebGIS la tendencia a la baja se inició diez días después y con menor pendiente. Las diferencias en la última parte del ciclo pueden deberse a que la K_c obtenida por medio del índice NDVI facilita valores locales, reales, del cultivo, frente a los valores teóricos de la bibliografía.

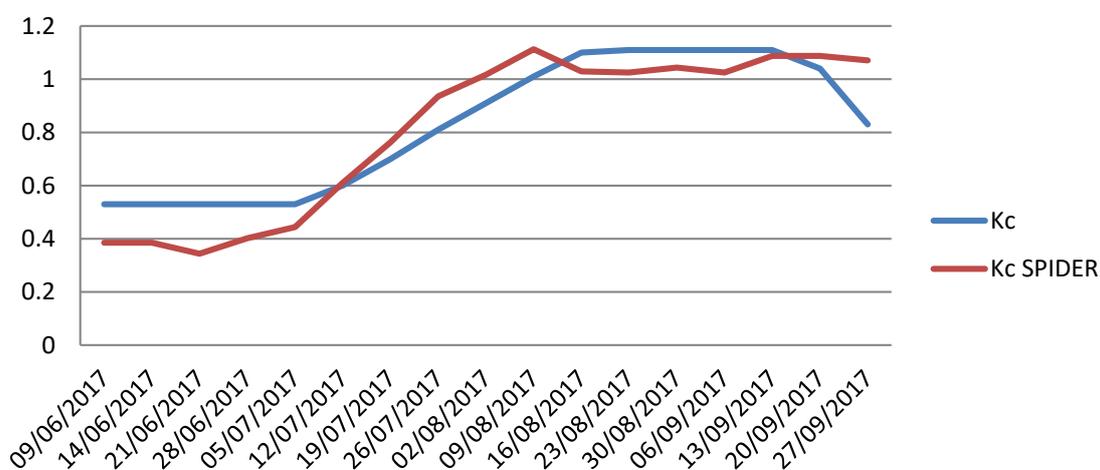


Figura 29. Evolución del coeficiente K_c de la parcela donde está instalado el equipo nº 17. Datos calculados a partir de la red SIAR y del SPIDERwebSIG (Elaboración propia)

Teniendo en cuenta que la estimación precisa del coeficiente del cultivo (K_c) es crucial para estimar la evapotranspiración del cultivo real (ET_o) y planificar un manejo apropiado del riego para un rendimiento eficiente del cultivo (Park, Baik, & Choi, 2017), las ventajas de la opción basada en teledetección podrían ser sustanciales. De hecho, los resultados coinciden con los de C. Zhang et al. (2018), que indicaron que el uso del índice NDVI derivado de los datos de Sentinel-2 para detectar la respuesta de los cultivos al estrés hídrico y calcular sus necesidades es un método ventajoso para llevar a cabo la programación de riegos del cultivo.

3.4.2. Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza

La Comunidad de Regantes APAC de Mequinenza, en Zaragoza, tiene en riego una superficie total que abarca 1.535 has, repartidas en un total de 166 agrupaciones, con un tamaño medio por agrupación de 9,25 ha.

Caso a:

En el caso que nos ocupa se ha obtenido, mediante la técnica de teledetección, el NDVI en la parcela 22 del polígono 12 de Mequinenza, cultivada con almendro, variedad Velona y plantado en 2012 a un marco de 5,5 m × 3 m. En esta parcela está instalado el equipo nº 7. El sistema de riego es de dos líneas de goteo (2,2 l/h a 75 cm) por línea de árboles.

El objetivo del caso de estudio fue identificar las necesidades de riego del almendro en la campaña de 2016 a partir del NDVI obtenido con los satélites Landsat 8 y Sentinel. El tamaño de los píxeles es de 30 m × 30 m y de 10 m × 10 m, respectivamente.

Conforme al procedimiento detallado en la sección 2.5.2, se seleccionaron cinco puntos dentro de la parcela y se obtuvieron los valores de NDVI desde el 30/03/2017 hasta el 29/09/2017, calculándose la media. Posteriormente procedió a un filtrado de la información, tomando tendencias para eliminar diferencias debidas a diferentes sensores instalados en Landsat y Sentinel (*kriging*).

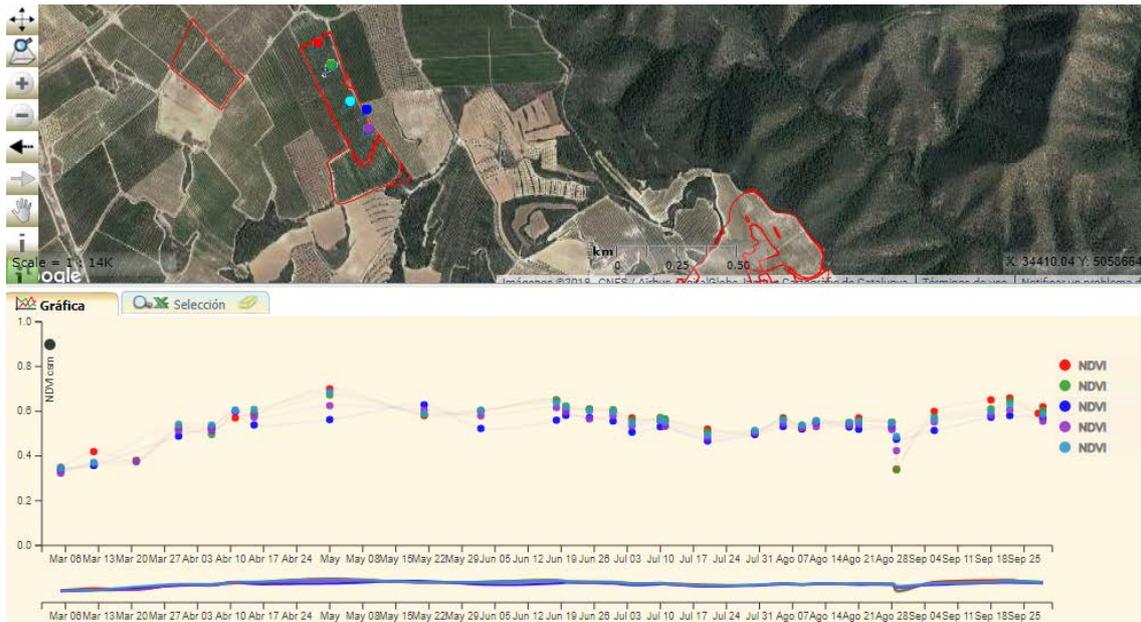


Figura 30. Puntos seleccionados en la parcela (arriba) y valores del índice NDVI obtenido por teledetección gracias al *software* SPIDERwebSIG (abajo)

Tras importar los valores del NDVI, se observó que en algunas de las imágenes se encontraron nubes en la parcela (que impiden la lectura del NDVI) o en las proximidades de la parcela (que distorsionan la información). En este segundo caso se produce una lectura errónea del índice NDVI al generarse un efecto multiplicador de la reflectancia que hace que ese valor se eleve por encima de lo habitual, por lo que en alguna imagen ha sido necesario descartarlo.

Una vez eliminados aquellos datos que no aportaban resultados y tomadas tendencias de los valores obtenidos, se calcularon a partir del NDVI los valores de K_c para esas fechas. La evolución fue la siguiente (Figura 31):

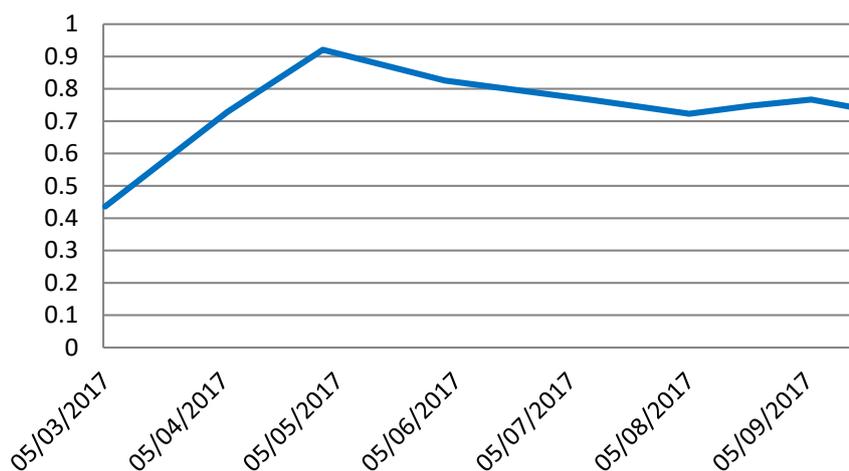


Figura 31. Evolución de la K_c de marzo a septiembre de 2017 de la parcela 22 del polígono 12 de Mequinenza. Datos calculados a partir del índice NDVI obtenido en SPIDERwebSIG (Elaboración propia)

Estos resultados los podemos comparar con las fases del ciclo anual del almendro. Según (Gispert Folch, 2018), las fases del almendro en función de sus necesidades hídricas son las que se muestran a continuación (Figura 32):

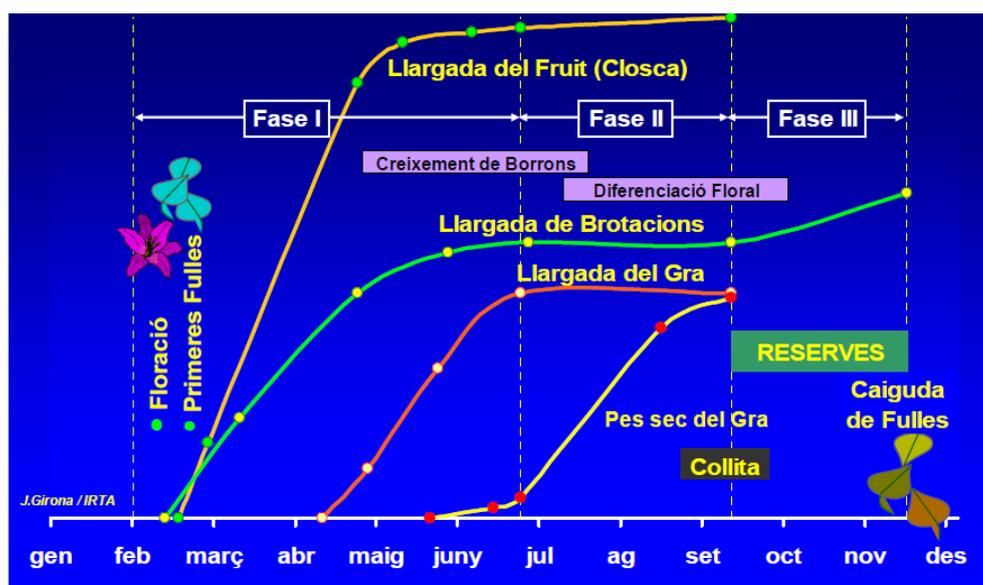


Figura 32. Fases del almendro en función de sus necesidades hídricas (Gispert Folch, 2018)

“...durante la primavera tienen lugar todos los procesos importantes de crecimiento (Fase I), y el crecimiento es muy sensible a la falta de agua. También durante la Fase I se ha producido la floración y el cuajado de los frutos, a la vez que se ha iniciado el crecimiento de yemas que al año siguiente, si pasan a flor, pueden dar frutos.

En verano (Fase II), casi únicamente se realiza el transporte de los carbohidratos de las hojas y de los puntos de reserva hacia el fruto (proceso poco sensible al déficit hídrico), aunque es necesario evitar una situación de sequía muy fuerte porque hay que mantener en funcionamiento la fotosíntesis en las hojas y, así, seguir produciendo carbohidratos (también el proceso de la fotosíntesis es bastante tolerante al déficit hídrico).

Después de la cosecha, y hasta la caída de hojas (Fase III), es importante mantener el árbol funcionando ya que se han de producir las reservas de carbohidratos que necesitará al inicio del ciclo del año siguiente en la floración-cuajado e inicio de la vegetación. Estos procesos son altamente exigentes en carbohidratos y, como el árbol no tiene hojas, estos han de venir de las reservas acumuladas en la Fase III del año anterior...” (Gispert Folch, 2018).

Si superponemos el gráfico de la evolución de la K_c obtenido por teledetección con las fases del almendro vistas previamente, observamos que la correspondencia es buena: en la Fase I, la K_c aumenta hasta inicios de mayo, para disminuir durante la Fase II y volver a repuntar en la última Fase III a inicios de septiembre.

Caso b:

Se estudia en este caso la parcela 17 del polígono 16 del T.M. de Mequinenza. En este caso también se trata de almendro, variedad Lauranne, plantado en enero de 2012. El sistema de riego son dos líneas de gotero de 2,2 l/h a 75 cm de separación.

Aparte de lo que recogido en el caso anterior, la herramienta de teledetección sirve para comprobar cualquier situación problemática que conlleve un cambio en la vegetación, como puede ser un problema de riego o bien enfermedades del cultivo. Si bien la observación directa de las imágenes de satélite puede llevar a detectar cualquier anomalía de este tipo, el índice NDVI las hace más evidentes. La escala de valores del NDVI es la siguiente (Figura 33):

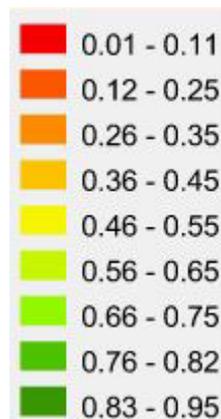


Figura 33. Escala de valores del índice NDVI. Obtenida de SPIDERwebSIG

En este caso, como se aprecia en la siguiente secuencia de imágenes (Figura 34 a Figura 40), no existió a lo largo del año ninguna anomalía grave: el cultivo de desarrolla de forma normal en lo que respecta al desarrollo de la vegetación.

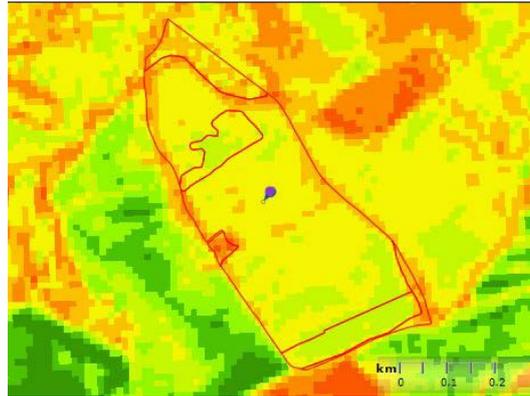


Figura 34. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo n.º 18 (Mequinenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 17-03-17

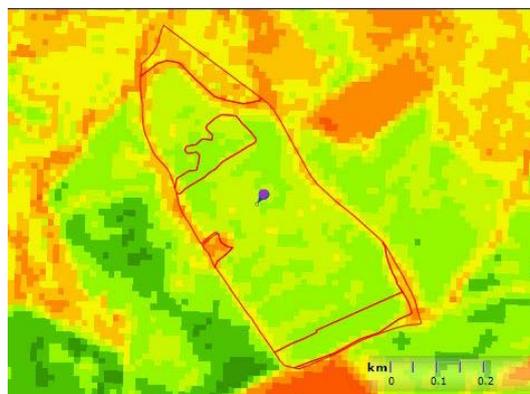


Figura 35. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo n.º 18 (Mequinenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 06-04-17

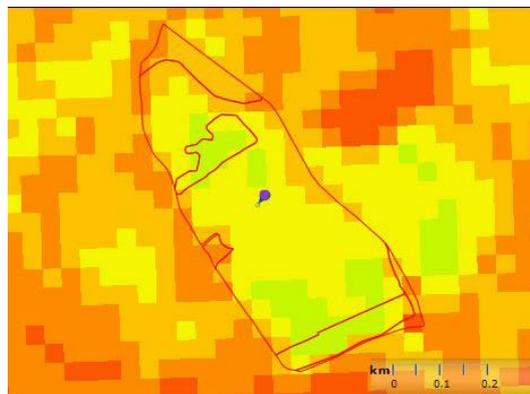


Figura 36. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo n.º 18 (Mequinenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 20-05-17

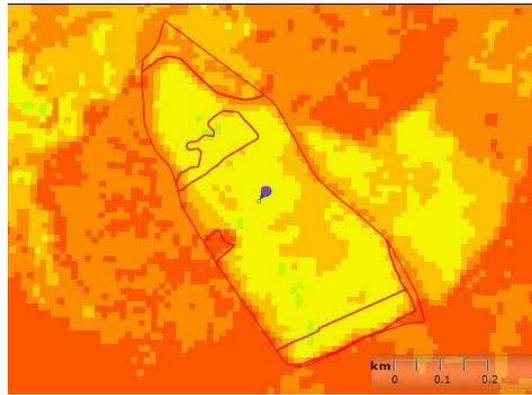


Figura 37. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 15-06-17

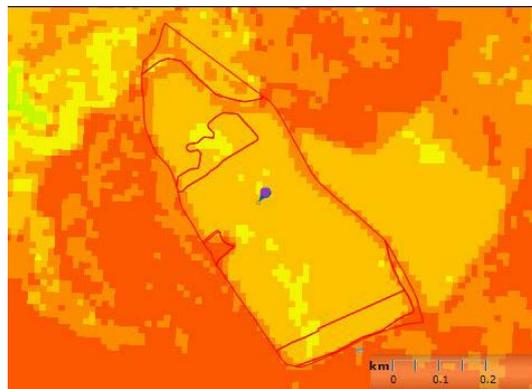


Figura 38. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 20-07-17

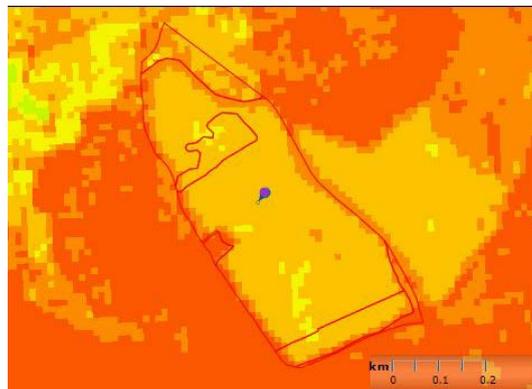


Figura 39. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 04-08-17

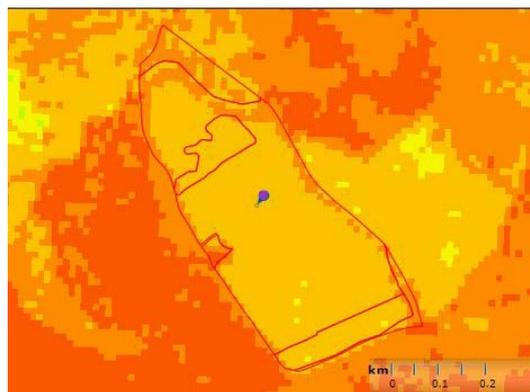


Figura 40. Evolución del índice NDVI en la parcela donde se encuentra instalado el equipo nº 18 (Mequinenza). Imagen obtenida por el SPIDERwebSIG para la fecha 08-09-17

La teledetección puede emplearse no sólo para desarrollar planes adecuados de gestión hídrica y agrícola, sino también para analizar y predecir la productividad del rendimiento de los cultivos y la sequía agrícola (Park et al., 2017).

En este caso de estudio se ha comparado el cálculo de la evapotranspiración potencial desde la estación meteorológica de la red SIAR más cercana a la parcela de cultivo con el de la estación instalada en una parcela cercana (Figura 41). Al estar situada la estación meteorológica en la que se basa la red SIAR en esta zona a unos 20 km de la parcela, es de suponer que, a priori, existan diferencias en los cálculos. Si bien se observa que la evapotranspiración de referencia calculada a partir de la estación instalada en la parcela es menor durante todo el mes de junio y julio, la diferencia de cálculo entre estaciones fue tan sólo de un 7%, con lo que la inversión asociada a la instalación de las estaciones meteorológicas sería difícil de justificar económicamente.

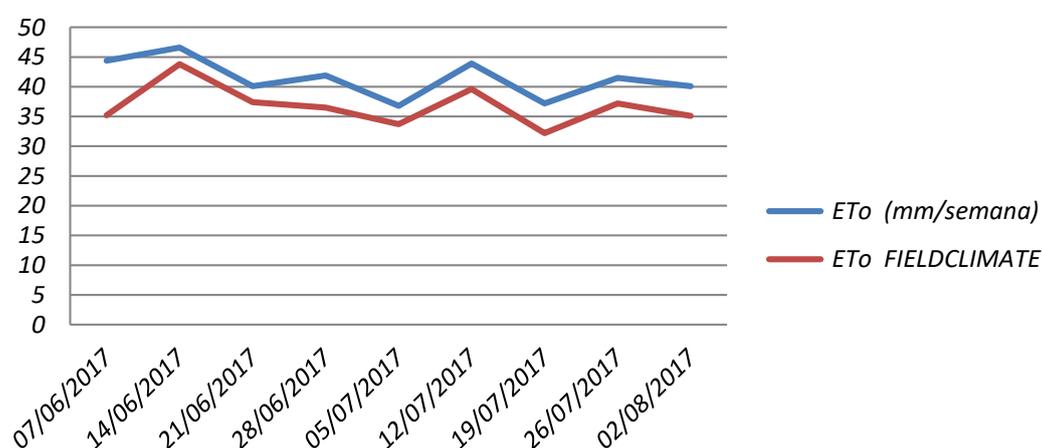


Figura 41. Comparación de la ET₀ de la parcela 17 del polígono 16 de Mequinenza calculada con los datos de la red SIAR (teórica) y con los datos de la estación meteorológica iMETOS (estación propia) instalada en campo (Elaboración propia)

Ahora bien, el efecto de calcular K_c a partir de datos de teledetección puede ser más notorio: se ha calculado la K_c en esta parcela a partir de la información de SPIDERwebSIG y se ha comparado con la facilitada a través de la red SIAR (similar a lo ya visto para el caso (a) de la Comunidad de Regantes de Bárdenas).

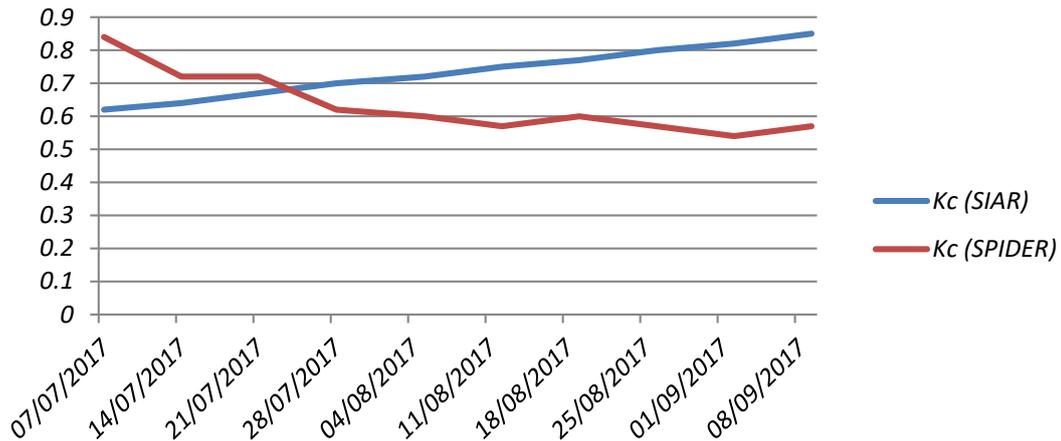


Figura 42. Evolución del coeficiente K_c de la parcela donde está instalado el equipo nº 18. Datos calculados a partir de la red SIAR y del SPIDERwebSIG (Elaboración propia)

En este caso se observan diferencias mucho más claras entre la K_c calculada a partir del SPIDERwebSIG y la calculada a partir de la red SIAR: a partir del mes de agosto, la K_c calculada a partir de la red SIAR aumenta mientras que la calculada a partir del SPIDERwebGIS disminuye.

Si se comparan con la Figura 32, se aprecia que los valores de Gispert Folch (2018) encajan mucho mejor con la evolución de la K_c calculada a partir del SPIDERwebSIG. Entre julio y septiembre aproximadamente, en el ciclo del almendro se lleva a cabo el transporte de los carbohidratos de las hojas y de los puntos de reserva hacia el fruto (proceso poco sensible al déficit hídrico), y por ello la K_c calculada a partir del SPIDERwebGIS se mantiene o incluso disminuye un poco. En el caso de la K_c calculada a partir de la red SIAR, sigue en aumento todos los meses hasta casi la época de cosecha.

Este ejemplo pone en evidencia que pueden existir diferencias notables entre el coeficiente del cultivo obtenido utilizando teledetección y los datos genéricos de la red SIAR. El cálculo de los K_c adaptados al área de estudio puede suponer importantes ahorros de agua.

4. CONCLUSIONES

- El estudio previo del suelo, la profundidad y una correcta instalación de los sensores son factores determinantes para garantizar la bondad y representatividad de los datos de humedad recogidos con los mismos. La redundancia en estos montajes es esencial para asegurar una alta disponibilidad.
- Los sensores de humedad en suelo y tensiómetros constituyen una herramienta de gran utilidad para gestionar el riego a nivel de parcela, permitiendo el seguimiento del estado hídrico del suelo en tiempo real y una rápida respuesta por parte del agricultor para ajustar las dosis aplicadas.
- La utilidad de las estaciones meteorológicas demuestra ser más limitada: las desviaciones de los datos recogidos por las estaciones de la red SIAR respecto a los recogidos *in situ* suponen diferencias inferior al 10% en el cálculo de las necesidades de los cultivos, que no justifican la inversión.
- El uso de herramientas de teledetección para la determinación del índice NDVI, a través de una herramienta sencilla e intuitiva como SpiderWebGIS, constituye un excelente complemento a la monitorización en campo. Aparte de permitir observar anomalías a lo largo de la campaña de cultivo, posibilitan el cálculo de coeficientes del cultivo ajustados a la zona de estudio, aumentando la precisión de las estimaciones de necesidades del cultivo frente a métodos ampliamente utilizados como el modelo FAO 56.
- La combinación de sondas de humedad y teledetección en parcela puede conllevar importantes ahorros en el consumo de agua, a través de una planificación y gestión más eficiente del riego, independientemente del sistema empleado (aspersión o goteo).

5. RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

De cara a la campaña siguiente, una vez ajustada la programación de riego de cada uno de los cultivos del presente trabajo, sería interesante llevar a cabo un estudio del ahorro energético y del agua consumida. Con esta información se podría comprobar que herramientas como las propuestas, pese a suponer una inversión para los agricultores, son fácilmente realmente amortizables en un periodo de tiempo relativamente corto, y más en Comunidades de Regantes donde el coste de bombeo del agua es importante, como suele ser el caso en Aragón

Asimismo, otra de las mejoras que se podrían implementar consistiría en el desarrollo de una herramienta (o aplicación móvil) que notifique a los agricultores el estado hídrico de su parcela cada cierto periodo de tiempo, similar a SIARapp, pero con datos obtenidos *in situ* para sus parcelas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). Advanced Monitoring and Management Systems for Improving Sustainability in Precision Irrigation. *Sustainability*, *9*(3), 29. doi:10.3390/su9030353
- Battude, M., Al Bitar, A., Brut, A., Tallec, T., Huc, M., Cros, J., . . . Demarez, V. (2017). Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agricultural Water Management*, *189*, 123-136. doi:10.1016/j.agwat.2017.04.018
- Bousbih, S., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Baghdadi, N., El Hajj, M., Gao, Q., & Mougenot, B. (2017). Potential of Sentinel-1 Radar Data for the Assessment of Soil and Cereal Cover Parameters. *Sensors*, *17*(11). doi:10.3390/s17112617
- Colaizzi, P. D., O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., & Mounce, R. B. (2017). Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers aboard center pivots. *Agricultural Water Management*, *187*, 173-189. doi:10.1016/j.agwat.2017.03.016
- Ferrándiz Molina, J. (2017). Estudio del manejo del agua de riego mediante sensores de humedad.
- Garrido-Rubio, J., González Gómez, L., Arellano Alcazar, I., Madurga del Cura, C., Navarro Comalrena de Sobregrau, M., López Tapia, J., & Calera Belmonte, A. (2015). *PREDICCIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS CON UNA SEMANA DE ANTELACIÓN MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y METEOROLOGÍA EN LA FINCA EXPERIMENTAL DEL CENTER PARA CULTIVOS DE MAÍZ*. Paper presented at the XXXIII CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS. Valencia 16-18 junio de 2015.
- Gispert Folch, J. R. (2018). *Aplicación eficiente del agua de riego en el almendro*. Paper presented at the II Jornada de l'ametller i altra fruita seca alternativa, Mas de Bover, Spain.
- Holzapfel, E. A., Pannunzio, A., Lorite, I., de Oliveira, A. S. S., & Farkas, I. (2009). DESIGN AND MANAGEMENT OF IRRIGATION SYSTEMS. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *69*, 17-25.
- Masseroni, D., Ortuani, B., Corti, M., Gallina, P. M., Cocetta, G., Ferrante, A., & Facchi, A. (2017). Assessing the Reliability of Thermal and Optical Imaging Techniques for Detecting Crop Water Status under Different Nitrogen Levels. *Sustainability*, *9*(9). doi:10.3390/su9091548
- Oberholzer, S., Prasuhn, V., & Hund, A. (2017). Crop water use under Swiss pedoclimatic conditions - Evaluation of lysimeter data covering a seven-year period. *Field Crops Research*, *211*, 48-65. doi:10.1016/j.fcr.2017.06.003
- Park, J., Baik, J., & Choi, M. (2017). Satellite-based crop coefficient and evapotranspiration using surface soil moisture and vegetation indices in Northeast Asia. *Catena*, *156*, 305-314. doi:10.1016/j.catena.2017.04.013

-
- Santos, L. N. S. d., Matsura, E. E., Gonçalves, I. Z., Barbosa, E. A. A., Nazário, A. A., Tuta, N. F., . . . de Sousa, A. C. M. (2016). Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management*, *170*, 91-98. doi:10.1016/j.agwat.2015.09.025
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, *70*(5), 1569. doi:10.2136/sssaj2005.0117
- Sui, R., & Baggard, J. (2015). Wireless sensor network for monitoring soil moisture and weather conditions. *Applied engineering in agriculture*, *31*(2), 193-200.
- Xiao, L., Feng, M., Yang, W., & Ding, G. (2015). Estimation of Water Content in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) and Soil Based on Remote Sensing Data-Vegetation Index. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *46*(14), 1827-1839. doi:10.1080/00103624.2015.1059844
- Xu, C., Qu, J. J., Hao, X., Cosh, M. H., Prueger, J. H., Zhu, Z., & Gutenberg, L. (2018). Downscaling of Surface Soil Moisture Retrieval by Combining MODIS/Landsat and In Situ Measurements. *Remote Sensing*, *10*(2). doi:10.3390/rs10020210
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, *2017*, 1-17. doi:10.1155/2017/1353691
- Zhang, C., Pattey, E., Liu, J., Cai, H., Shang, J., & Dong, T. (2018). Retrieving Leaf and Canopy Water Content of Winter Wheat Using Vegetation Water Indices. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *11*(1), 112-126. doi:10.1109/jstars.2017.2773625
- Zhang, S., Roussel, N., Boniface, K., Ha, M. C., Frappart, F., Darrozes, J., . . . Calvet, J.-C. (2017). Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(9), 4767-4784. doi:10.5194/hess-21-4767-2017
- Zhu, X. Y., Chikangaise, P., Shi, W. D., Chen, W. H., & Yuan, S. Q. (2018). Review of intelligent sprinkler irrigation technologies for remote autonomous system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *11*(1), 23-30. doi:10.25165/j.ijabe.20181101.3557