

APLICACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL RIEGO Y LA FERTILIZACIÓN DEL OLIVAR REGADO CON AGUAS REGENERADAS

Alcaide Zaragoza, C.¹ (P), Fernández García, I.², González Perea, R.³, Camacho Poyato, E.⁴, Montesinos Barrios, P.⁵, Rodríguez Díaz, J.A.⁶

¹ Investigador predoctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba. g12alzac@uco.es

² Profesora Sustituta Interina, Departamento de Ingeniería eléctrica, Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci. g52fegai@uco.es

³ Investigador Juan de la Cierva. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Universidad de Castilla-La Mancha, Campus universitario s/n, 02071. Albacete. Rafael.GonzalezPerea@uclm.es

⁴ Catedrático. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba. ecamacho@uco.es

⁵ Catedrática. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba. pmontesinos@uco.es

⁶ Profesor Titular. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba. jarodriguez@uco.es

Resumen

En Andalucía el cultivo predominante es el olivar, el cual juega un papel fundamental en su sociedad, ya que no solo ha marcado su paisaje y cultura, sino que también es la principal actividad económica de muchos de sus pueblos. Dada su extensión, y pese a seguir estrategias de riego deficitario, es el cultivo con mayor demanda hídrica de la Cuenca del Guadalquivir. A esto hay que añadir que, por lo general, la fertilización del olivar no se realiza de forma precisa, ya que se siguen criterios basados en la tradición, sin utilizar métodos de diagnóstico ni conocer las características del suelo o del agua que se aplica. Esto provoca aportaciones en exceso de algunos nutrientes, especialmente nitrógeno, lo que ocasiona problemas medioambientales tales como contaminación atmosférica, de suelos o de acuíferos. Este problema puede agravarse en el caso de riego con aguas regeneradas ya que incorporan una cantidad considerable de nutrientes, siendo esta aportación, además, variable a lo largo del año, por lo que resulta esencial que se realice una gestión óptima de las mismas. Sin embargo, el empleo de aguas regeneradas para riego en olivar está generando gran interés como alternativa al uso de fuentes de agua convencionales con el objetivo de resolver los desequilibrios entre la disponibilidad y la demanda de agua. Para ello, este trabajo, propone una aplicación que gestiona en tiempo real el riego y la fertilización del olivar regado con este tipo de aguas. El modelo en el que se basa tiene en cuenta datos climáticos, características del suelo, del sistema de riego, dotación anual concedida, análisis del estado nutritivo del árbol y de la calidad del agua.

1- Introducción

En España, más del 75% del agua dulce total distribuida va destinada a la agricultura de regadío (INE, 2018), lo que provoca que ésta sea especialmente vulnerable ante periodos de sequía. Este problema se agrava si se consideran los efectos del cambio climático, los cuales están causando importantes alteraciones en los patrones de lluvia y temperatura, así como un aumento en la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos (Beniston et al., 2007). Esto provocará un aumento en la demanda de agua y en el déficit de

agua en el suelo, convirtiendo a España en uno de los países con mayor estrés hídrico del mundo (Bisselink et al., 2018). Por todo esto, la agricultura de regadío tendrá que adaptarse para hacer frente a estos desafíos. Esta situación se agudiza en Andalucía, ya que la agricultura es uno de los pilares de su economía. En esta región, el cultivo predominante es el olivar, el cual tiene un papel fundamental en la sociedad, además de ser la actividad económica principal de muchos de sus pueblos. Sin embargo, debido a su extensión, y pese a seguir estrategias de riego deficitario, el olivar es el cultivo que mayor cantidad de agua usa en la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir, más de 580 hm³/año, lo que implica alrededor del 20% del total del agua usada por la agricultura (CHG, 2016). Por otro lado, la fertilización de este cultivo, generalmente, se realiza de forma poco precisa, siguiendo prácticas culturales tradicionales y sin métodos de diagnóstico previos sobre el estado nutritivo del árbol o análisis sobre la calidad de agua. Esto provoca que se realice una fertilización en exceso del olivo, especialmente de nitrógeno, lo que ocasiona no solo pérdidas económicas sino también problemas medioambientales como contaminación de acuíferos, del suelo y de la atmósfera (Fernández-Escobar et al., 2009). Esta situación puede agravarse para el caso de riego con aguas regeneradas, ya que dichas aguas ya incorporan una cantidad importante de nutrientes, siendo ésta además variable a lo largo del año. Sin embargo, la utilización de este tipo de aguas, gestionadas correctamente y con ayuda de los nuevos avances en Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs), puede convertirse en una solución estratégica a la problemática planteada (Trinh et al., 2013).

Las aguas residuales tratadas son aguas de origen doméstico, municipal o industrial que han sido procesadas en una planta de tratamiento. Las aguas regeneradas son aguas residuales tratadas que han recibido un tratamiento adicional que las hace adecuadas para su reutilización en el riego agrícola, riego de jardines, recarga de acuíferos, etc. Este tipo de aguas deben alcanzar unos mínimos de calidad, los cuales se establecen en el RD 1620/2007 y la propuesta de la Comisión Europea para los requerimientos mínimos para la reutilización de agua (2018). Chen et al. (2013) y Ródenas y Albacete (2014) afirman que el uso de este tipo de aguas no solo puede ser una estrategia viable a la problemática asociada a la escasez de agua sino que puede conllevar también beneficios para el medioambiente. Erel et al. (2019) realizaron un estudio comparativo de riego de olivar regado con aguas regeneradas y agua dulce durante ocho años. De este estudio obtuvieron que no era necesario aplicar fertilizante cuando se regaba con aguas regeneradas, ya que este tipo de aguas cubría las necesidades nutritivas del olivo. Sin embargo, también exponían la importancia de un control continuo cuando se utilizaban estas aguas para riego. Por otro lado, los impactos del uso de aguas regeneradas para riego de olivar han sido considerados por varios autores, los cuales centran su atención en los impactos en el suelo (Petousi et al., 2015; Segal et al., 2011), en el desarrollo del árbol (Ayoub et al., 2016; Bedbabis et al., 2010) y en la calidad del aceite (Bedbabis et al., 2010; Bourazanis et al., 2016), concluyendo que el uso de estas aguas, siempre que se haga de manera controlada y se realicen los correspondientes análisis regularmente, no afecta a ninguno de los parámetros evaluados.

Por otro lado, diferentes autores han desarrollado aplicaciones enfocadas a la gestión del riego y la fertilización. Bueno-Delgado et al. (2017) y Pagán et al. (2015) propusieron herramientas que determinaban el tipo de fertilizante que debería aplicarse, desde un punto de vista económico, teniendo en cuenta la calidad del agua de riego. Sin embargo, en ambos trabajos era necesario conocer la solución nutritiva ideal, la cual el agricultor con frecuencia desconoce. Pérez-Castro et al. (2017) desarrollaron una aplicación que determinaba la cantidad de fertilizante que se debe aplicar según el tipo de cultivo y las condiciones del sistema. Sin embargo, esta aplicación solo era aplicable para cultivos hortícolas de invernadero. Considerando la gestión del agua de riego, González Perea et al. (2017) implementaron los principios del riego de precisión para el cultivo de la fresa en la aplicación irrifresa, de fácil manejo para el agricultor y que conllevó importantes ahorros de

agua en el entorno de Doñana. Mérida García et al. (2018) presentaron un modelo de gestión óptima de riego de olivar mediante energía solar que ajustaba el riego según las necesidades de riego del cultivo en tiempo real. Sin embargo, no existe ninguna herramienta de gestión que integre todos los elementos anteriormente citados: gestión del uso del agua y el fertilizante para el cultivo de olivar regado mediante aguas regeneradas

2- Objetivos

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una aplicación, de escritorio y para dispositivos móviles, destinada a agricultores y técnicos, para la programación conjunta y en tiempo real del riego y la fertilización en olivar regado con aguas regeneradas, que maximice la eficiencia en el uso del agua y del fertilizante.

3- Materiales y Métodos

3.1- Caso de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en la Comunidad de Regantes (C.R.) de Tintín, localizada en Montilla (Córdoba), concretamente en una finca comercial de olivar tradicional. El clima de esta zona es mediterráneo, con una precipitación media anual (P_t) de 590 mm, principalmente en primavera y otoño. La temperatura media anual (T_m) es de 16.9°C y la evapotranspiración de referencia media (ET_0) es 3 mm día⁻¹. La finca está compuesta por árboles adultos (*Olea europea* L., cv 'Hojiblanca' y *Olea europea* L., cv 'Nevadillo azul') espaciados a 8 x 8 m para la producción de aceite. El agua utilizada para el riego procede de la EDAR de Montilla y se almacena en una balsa. Desde allí se distribuye a los regantes mediante una estación de bombeo localizada aguas abajo de dicha balsa. El sistema de riego empleado es riego por goteo subterráneo, con goteros de 2.2 l/h, enterrados a 40 cm y espaciados 1 m.

3.2- Caracterización de la finca

La caracterización de la finca consiste en la caracterización hidráulica del sistema de riego, del suelo, del estado nutricional de los árboles y de la calidad del agua de riego. Para ello fue necesario el levantamiento de la red de riego y su posterior digitalización. A continuación, se realizó la simulación hidráulica del sistema de riego en EPANET (Rossman, 2000) para obtener la eficiencia de riego de la parcela. Respecto a la caracterización del suelo, se tomaron ocho muestras de suelo en cuatro puntos diferentes, considerando cambios en la morfología, color, pendiente y profundidad. Dos de esos puntos se localizaron bajo el árbol y los dos restantes en las calles. En cada punto seleccionado se tomaron dos muestras, una en la capa de suelo de 0-15 cm y la otra en la de 15-30 cm para evaluar textura, pH y contenido de nutrientes. Respecto al estado nutricional del árbol se realizaron análisis foliares en el mes de julio. Se tomaron dos muestras, correspondientes a las dos variedades de olivo presentes en la finca, formadas por 100 hojas de 50 árboles cada una. Finalmente, para la evaluación de la calidad de agua de riego se tomaron muestras en dos ocasiones en diferentes puntos de la instalación, pero para este estudio solo se tuvo en cuenta la muestra de agua obtenida en parcela.

3.3- Descripción del modelo

El modelo en el que se basa la aplicación tiene como objetivo proporcionar la cantidad de agua y fertilizante óptimos a aportar en tiempo real, ajustando estos valores a las necesidades reales del cultivo, asegurando así la sostenibilidad del sistema productivo. El modelo, denominado *REUTICVAR*, se ha desarrollado en MATLABTM (Pratap, 2017) y

está formado por cinco módulos independientes pero interconectados: 1) características de la plantación, 2) datos climáticos, 3) volumen de agua mensual disponible 4) programación del riego y 5) programación de la fertilización. Estos módulos se describen a continuación.

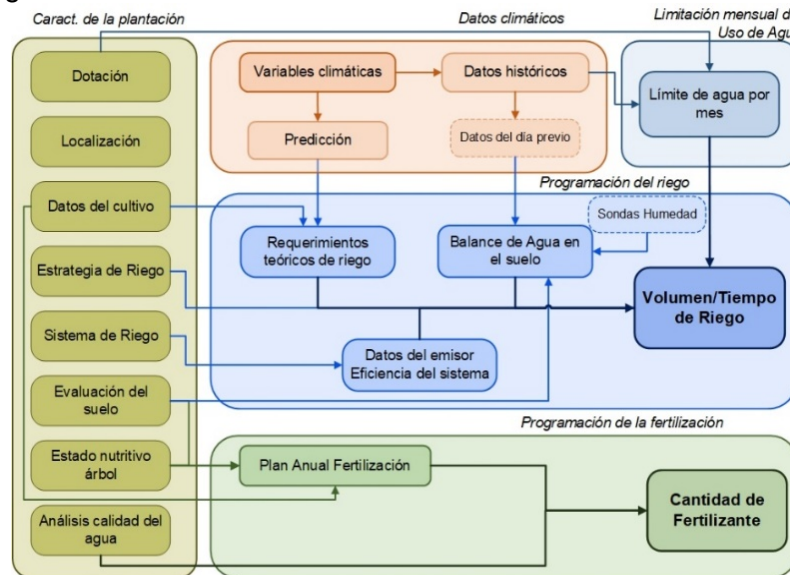


Figura 1. Esquema general modelo REUTICVAR

3.3.1- Características de la plantación

En este módulo se introducen los datos generales de la plantación tales como localización, dotación concedida, datos del cultivo (coeficiente de cultivo, ciclo productivo, etc.), características del suelo, estrategia de riego seleccionada, características del sistema de riego (caudal de gotero, separación goteros, etc.), estado nutritivo del árbol y calidad del agua de riego.

3.3.2- Datos climáticos

Este módulo contempla dos submódulos, ambos dependientes de la localización: predicción meteorológica y registros agroclimáticos históricos. En primer lugar, a partir de la localización, se determina la estación agroclimática más cercana de las disponibles en la Red de Estaciones Agroclimáticas de Andalucía. De esta estación, mediante técnicas de *web scraping*, se obtienen todos los valores históricos disponibles de P y ET_0 diarios, los cuales se almacenan en una base de datos relacional. Además, cada día, se actualiza dicha base de datos con los valores de P y ET_0 del día anterior.

Así mismo, de forma diaria, se obtiene la predicción meteorológica de la zona para una semana mediante el uso de *AEMET OpenData*, la API REST (Application Programming Interface. REpresentational State Transfer) que la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2015) pone a disposición de los usuarios. Los parámetros obtenidos son temperatura media (T_m), temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), humedad relativa máxima (HR_{max}), humedad relativa mínima (HR_{min}), velocidad del viento (u_2) e índice de nubosidad (nu), los cuales mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen, 1998), se utilizan para obtener el valor de la evapotranspiración de referencia, ET_0 . Por último, se obtiene el valor de la predicción de la precipitación (P) siguiendo la misma metodología. Toda esta información es la que se usa para la programación de los eventos de riego.

3.3.3- Agua mensual disponible

En este módulo se establecen los límites mensuales de la cantidad de agua que se puede utilizar para riego, para ajustar la dotación concedida a las necesidades del olivo, de forma que se garantice disponibilidad en los momentos en los que el cultivo es más sensible al estrés hídrico. Esta limitación mensual se obtiene a partir de la concesión de uso de aguas regeneradas, de la estrategia de riego que se adopte y de las necesidades de riego históricas del olivo en la zona, calculadas a partir de los datos históricos de la estación agroclimática y de las características del cultivo. De forma quincenal, se comprueba si se ha consumido el agua inicialmente establecida. En caso contrario, se realiza una corrección y se vuelve a calcular el límite de agua para los meses restantes hasta terminar la campaña de riego, de forma que el agua no usada se pueda aplicar en dichos meses.

3.3.4- Programación del riego

La programación del riego se realiza considerando los requerimientos teóricos de riego, el balance diario de agua en el suelo, la estrategia de riego seleccionada, las características del sistema de riego y la limitación mensual al uso del agua. Las necesidades hídricas de riego se calculan, de forma diaria y a partir de las predicciones meteorológicas, como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la precipitación efectiva (P_{ef}) del día de riego. La P_{ef} , es decir, el agua de lluvia almacenada en la zona radicular y la realmente aprovechable por el cultivo, se calcula por el método del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del USDA. Las necesidades de riego del cultivo se calculan para reponer la ET_c diaria, calculada por el método propuesto por la FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977):

$$ET_c = ET_0 \cdot k_c \cdot k_r \quad (1)$$

donde ET_0 se calcula con la predicción meteorológica (ver apartado 3.3.2); k_c es el coeficiente de cultivo para olivar, cuyos valores son los propuestos por Orgaz y Fereres (2001) (Tabla 1) y k_r es el coeficiente de cobertura, el cual es igual a 1 para árboles con más del 60% de cubierta o toma valores entre 0 y 1 en caso contrario, según las ecuaciones desarrolladas por Fereres et al. (1981).

Tabla 1. Coeficiente de cultivo (k_c) de olivar en la provincia de Córdoba

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,55	0,60	0,60	0,65

En cuanto a la estrategia de riego utilizada, el modelo ofrece tres opciones al usuario: riego completo (RC), riego deficitario sostenido (RDS) y riego deficitario controlado (RDC). El RC programa el evento de riego cubriendo el total de las necesidades que tiene el cultivo. El RDS distribuye equitativamente un porcentaje de las necesidades a lo largo de la campaña de riego. Por último, la estrategia de RDC también aplica un porcentaje del total de las necesidades teóricas pero, en este caso, el porcentaje es variable a lo largo de la campaña. Esta variabilidad se debe a que esta estrategia se adapta al ciclo fenológico del cultivo, concentrando la mayor aplicación de agua en las fases en las que el olivo es más sensible al estrés hídrico, con el objetivo de minimizar los impactos en el desarrollo del árbol, rendimiento y calidad del aceite. Estos porcentajes se seleccionaron siguiendo los criterios establecidos por Rallo y Cuevas (2017) y Orgaz, Fereres y Testi (2017). Para el caso particular de Andalucía, debido a los problemas asociados a la escasez de agua y a la extensión e importancia del cultivo de olivar, la estrategia recomendada es la de RDC (Moriana et al., 2003; Padilla-Díaz et al., 2016)

Además de las necesidades teóricas del cultivo y la estrategia de riego, para la programación de los eventos de riego, se tiene en cuenta el contenido de humedad en el

suelo. Para ello, se calcula el Balance de Agua en el Suelo (BAS) cuyo valor se reajusta semanalmente en el caso de disponer de sondas de humedad instaladas en campo, como es el caso de la finca de estudio. El BAS se calcula de forma diaria según la Ec. 4:

$$BAS_d = BAS_{d-1} + P_{\text{eff},d} + I_{\text{ap},d} - ET_{\text{c,adj},d} - R_d - D_d \quad (2)$$

donde BAS_{d-1} es el contenido de agua en el día anterior, $I_{\text{ap},d}$ el riego aplicado (mm), $ET_{\text{c,adj},d}$ la evapotranspiración del cultivo ajustada (mm), R_d la escorrentía (mm) y D_d la percolación profunda (mm). R_d y D_d son considerados nulos en este caso, ya que se trata de riego por goteo.

La $ET_{\text{c,adj}}$ se relaciona con la dificultad del cultivo de extraer el agua en el caso de que el contenido de humedad en el suelo sea bajo. El valor de esta variable se calcula mediante la Ec. 5:

$$ET_{\text{c,adj}} = ET_c \cdot \frac{ATD - D_r}{ATD - AFA} \quad (3)$$

donde ATD es el agua total disponible del suelo (mm); D_r , el agotamiento en la zona radicular (mm), calculado como la diferencia entre ATD y BAS_{d-1} , y AFA es el agua fácilmente aprovechable en el suelo (mm).

Como salida, el modelo proporciona el tiempo de riego t (h) según la Ec. 6:

$$t = \frac{H_r \cdot A_s \cdot 10^4}{IE \cdot \sum_{i=1}^e q_e \cdot n_e} \quad (4)$$

donde H_r son los requerimientos de riego (mm), A_s es el área del sector (ha), IE la eficiencia de riego, que en este caso se considera 0,90, q_e el caudal del gotero (L/h) y n_e el número de goteros del sector.

3.3.5- Programación de la fertilización

La programación de la fertilización se fundamenta, en primer lugar, en el establecimiento de un plan anual basado en la evaluación del estado nutritivo del árbol. Esta evaluación se lleva a cabo mediante la realización de análisis foliares (Fernández-Escobar et al., 2009b). La toma de muestras se lleva a cabo en el mes de julio del año previo ya que es el momento en el que la concentración de los elementos en hoja es estable y, además, es para el periodo para el cual están establecidos los niveles críticos de nutrientes en hoja (Fernández-Escobar, 2018), los cuales se muestran en la Tabla 2. La comparación de los resultados obtenidos de los análisis foliares con dichos niveles críticos es lo que proporciona información sobre el exceso o carencia de nutrientes en el árbol. La aplicación de fertilizante solo se aplicará en el caso de que exista deficiencia de algún elemento ya que, tal y como demostraron Fernández-Escobar et al. (2009a) la aplicación de fertilizante en caso contrario no solo no aumenta la productividad sino que también ocasiona problemas de contaminación y pérdida económica. En segundo lugar, y de forma complementaria y opcional, la programación de la fertilización se basa en la evaluación de la cantidad de nutrientes presentes en el suelo para comprobar si esta es suficiente para cubrir las necesidades de fertilización del olivar y diagnosticar toxicidades (Parra, 2017).

Tabla 2. Interpretación de los niveles de nutrientes en hoja de olivo recogidas en julio, expresados en porcentaje de materia seca

Elemento	Deficiente	Adecuado	Tóxico
Nitrógeno (N) (%)	1,2	1,3-1,7	> 1,7
Fósforo (P) (%)	0,05	0,1-0,3	-
Potasio (K) (%)	0,4	> 0,8	-

En caso de detección de deficiencia en algún elemento, se establece la cantidad del nutriente a aportar en función de una estimación del consumo del árbol de dicho elemento (Fernández-Escobar, 2017). Al año siguiente se vuelve a realizar el análisis foliar y se comprueba si es necesario aumentar o disminuir dicha dosis. En el caso del N, si su nivel en hoja es menor de 1,3% se aplican 0,5 kg/árbol de N, sin superar los 100 kg/ha. En el caso del K, cuando el valor sea inferior o igual a 0,7% en hoja, se aplicará 1 kg/árbol. Por último, en el caso del P, el valor inicial de aplicación será de 0,5 kg/árbol, en el caso de que su contenido en hoja sea inferior a 0,1%. La aplicación se hace en la fase central del riego ya que su eficacia es mayor y además evita que queden restos en los goteros a final de campaña. Se recomienda que la aplicación sea semanal ya que está demostrado que su eficacia es igual que una aplicación diaria, pero se necesita menos mano de obra, aunque el usuario puede modificar esta opción y hacer coincidir la aplicación del fertilizante con aplicación de agua.

Por último, una vez establecido el plan anual de fertilización, es necesario considerar la calidad de agua aplicada, ya que, si se tiene en cuenta que los casos que aborda este trabajo son árboles regados con aguas regeneradas, es posible que se estén aportando algunos nutrientes a través del riego. La cantidad de fertilizante final a aportar será la diferencia entre la programada inicialmente en el plan anual y la cantidad de nutrientes presentes en el agua.

3.4- Aplicación informática

El trabajo contempla la implementación del modelo descrito previamente en una aplicación de escritorio y para dispositivos móviles. En primer lugar, la aplicación de escritorio se ha desarrollado en el entorno gráfico para desarrollo de interfaces que MATLAB™ pone a disposición de sus usuarios, App Designer, de la versión R2018a de MATLAB. Posteriormente, para hacer la aplicación independiente y disponible para todos los usuarios, se ha llevado a cabo la compilación de la aplicación por medio de MATLAB Compiler™ con MATLAB Runtime versión R2018a. En cuanto a la aplicación móvil, en la actualidad se encuentra en desarrollo en Android Studio 3.3.2, el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial de Google para el desarrollo de aplicaciones con Sistema Operativo Android, para nivel 21 de API mínimo, que abarca más del 90 % de los dispositivos Android actuales. Estas aplicaciones se han probado para 2018 y con las mejoras introducidas se seguirán usando durante la campaña de riego de 2019 en la Comunidad de Regantes Tintín (Montilla).

4- Resultados y Discusión

4.1- Evaluación situación de partida

Los resultados relativos al análisis de suelo, a los análisis foliares y a los análisis de calidad de agua se observan en las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 3. Análisis de suelo realizados en septiembre de 2018 en la finca de estudio, localizada en la CR Tintín (Montilla)

Nombre muestra	Espesor (cm)	pH	C.E. (1:5) (dS/m)	Textura (%)			P (mg/Kg)	K (mg/Kg)
				Arcilla	Limo	Arena		
A1P1	0 – 15	8,12	0,09	37,8	26,7	35,3	14,1	563
A1P2	15 – 30	8,31	0,10	38,1	28,0	33,9	7,7	454
A2P1	0 – 15	8,33	0,11	33,8	23,3	42,0	9,9	454
A2P2	15 – 30	8,20	0,10	37,4	20,0	42,7	5,8	317
C1P1	0 – 15	8,10	0,27	37,0	28,0	34,4	23,6	872
C1P2	15 – 30	8,10	0,48	34,2	28,6	36,1	25,7	794
C2P1	0 – 15	8,12	0,47	32,0	23,4	43,5	22,8	978
C2P2	15 – 30	8,00	0,59	36,1	21,2	42,1	27,0	598

De los datos de suelo se interpreta, en primer lugar, que se trata de un suelo alcalino dado que el pH se encuentra comprendido entre 8 y 8,3 en todas las muestras, y que los valores en los que oscila permiten, por lo general, el correcto desarrollo del olivo (Parra, 2017). En cuanto a la conductividad eléctrica (C.E) en el extracto 1:5, la cual proporciona información acerca del contenido de sales, se observa un contenido mayor en las calles. Estos valores hacen que se considere el suelo como ligeramente salino. Sin embargo, es necesario considerar que la toma de muestras en suelo se realizó en septiembre, antes del comienzo de la época de lluvias, las cuales, en principio, serían suficientes para lavar el suelo, reduciendo así su salinidad, por lo que se considera que no presenta problemas en este sentido. Del análisis de las texturas mediante el triángulo textural del USDA, se obtuvo que el suelo en todas sus muestras se corresponde con el tipo franco-arcilloso. Además, mediante el modelo ROSETTA (Schaap, 1999) se obtuvieron las curvas de retención de humedad del suelo. De estas curvas se obtuvo que el valor de capacidad de campo (CC) para el suelo es de $0.41 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y el punto de marchitez permanente (PMP) de $0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Por último, en cuanto al contenido de macronutrientes, la cantidad de P en las calles es alta, mientras que en los árboles es menor, pero aun así se encuentra en un rango en el que es poco probable la respuesta al abonado, especialmente para el caso del olivo, ya que la importancia de este macronutriente es inferior que para otros cultivos anuales, debido a sus bajas extracciones y a su facilidad de reutilización (Fernández-Escobar, 2017). Además, se ha demostrado que un alto contenido en fósforo (P) puede ocasionar bloqueos de Cinc en el suelo, pudiendo provocar deficiencias de este en el olivo. Por último, en cuanto al contenido de potasio (K) en el suelo, también se observan valores altos para todas las muestras, por lo que al igual que el caso del P, la respuesta al abonado es poco probable. Lo niveles de nitrógeno (N) en suelo no se han analizado debido a la elevada movilidad a corto plazo de dicho elemento.

Tabla 4. Resultados de los análisis foliares realizados en julio de 2018 en la finca de estudio

Variedad	N (g/100g)	P (g/100g)	K (g/100g)
'Hojiblanca'	2,02	0,11	0,92
'Nevadillo azul'	1,35	0,13	0,88

Como se puede observar, en el caso de la variedad 'Nevadillo Azul', los niveles de todos los nutrientes en hoja se encuentran dentro del rango recomendado. En el caso de la variedad 'Hojiblanca', los valores de P y K en hoja también son adecuados. Sin embargo, el contenido de nitrógeno se encuentra en el rango de toxicidad. Numerosos estudios avalan los perjuicios ocasionados por un exceso de nitrógeno en olivar, tales como disminución de la calidad del aceite (Erel et al., 2013; Fernández-Escobar et al., 2006), mayor sensibilidad a las heladas (Fernández-Escobar et al., 2011) o retraso en la maduración del fruto, lo que suele relacionarse con una disminución del rendimiento graso (Fernández-Escobar et al., 2014), además de problemas de contaminación en el suelo por lixiviación (Fernández-Escobar et al., 2009a).

Tabla 5. Resultados de los análisis de agua realizados en la finca de estudio

Fecha	pH	C.E. (µS/cm)	SST (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	E. coli (UFC/100 ml)
21-ago-18	9	1.150	<10	5,1	1,9	700
25-sep-18	8,2	1.424	<10	3,8	1,3	10

Finalmente, en cuanto a la calidad del agua, se puede observar que el pH es también alcalino, lo cual es necesario considerar para la elección del tipo de fertilizante. La conductividad eléctrica no es elevada, por lo que el riesgo de salinidad se considera bajo (Troncoso et al., 2017). El resto de los parámetros se encuentran en el umbral establecido por la legislación.

4.2- Programación de fertirriego de precisión

La programación de fertirriego se ha aplicado a los datos disponibles de 2018, cuyos resultados se observan en la Figura 2. En esta figura, no hay información referente a la cantidad de fertilizante a aplicar en la campaña de riego debido a que, para el caso de estudio que se aborda, no es necesaria la aplicación de ningún fertilizante, debido a que el cultivo no presenta ninguna deficiencia nutricional y es suficiente con los nutrientes que ya de por sí incorporan las aguas regeneradas.

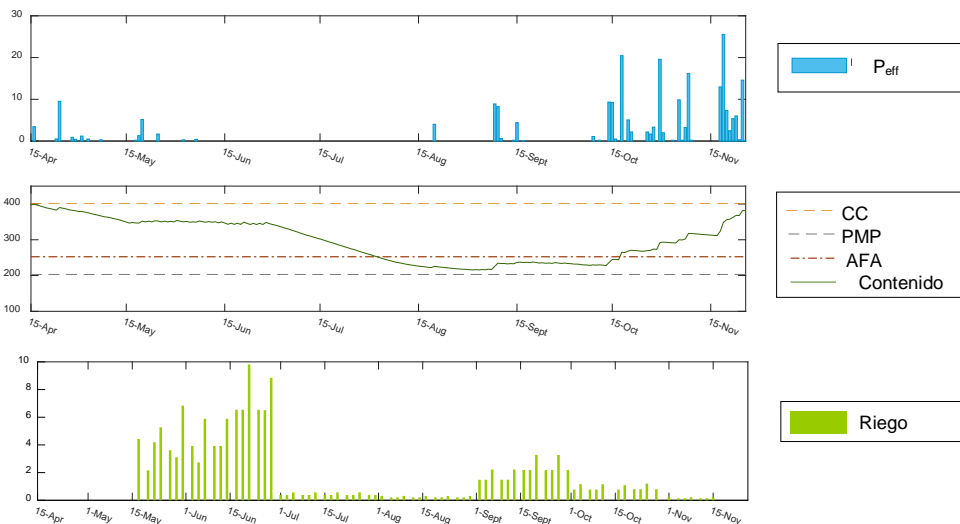


Figura 2. Distribución de la programación de riego propuesta, contenido de humedad en el suelo y precipitación efectiva a lo largo de la campaña de riego de 2018

El modelo ofrece una programación del riego que distribuye la dotación concedida aplicando un total de 1.490 m³/ha. Los momentos en los que se concentra el riego son mayo, junio y septiembre, momentos especialmente críticos al estrés hídrico (García et al., 2013; Rallo & Cuevas, 2017), concentrándose el déficit en los meses de verano. En agosto y hasta mediados de octubre, el contenido de agua en el suelo es inferior al contenido de agua fácilmente aprovechable, por lo que el cultivo tendrá mayor dificultad para extraer el agua del suelo.

4.3- Aplicación informática

El modelo se implementó en una aplicación informática. La Figura 3 muestra la interfaz gráfica de la versión para PC.

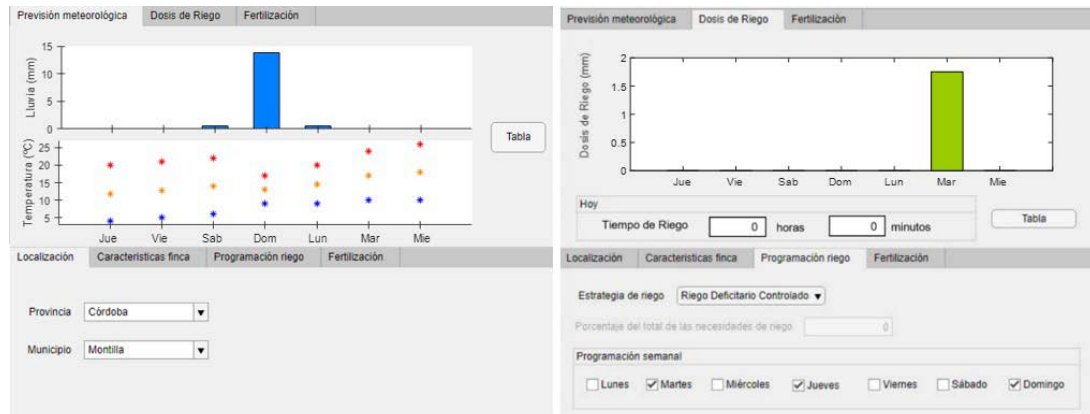


Figura 3. Interfaz gráfica de la aplicación en versión de PC para la predicción de la programación para la semana del 28/03/2019 al 03/04/2019

En la aplicación informática el usuario debe introducir los datos mencionados anteriormente. Esto se realiza en la parte inferior de la interfaz, la cual se divide en cuatro pestañas: localización, características finca, programación riego y fertilización. En la parte superior aparecen gráficas de la predicción semanal de clima, riego y fertilización para la semana del 28/03/2019 al 03/04/2019. En este caso, pese a existir precipitación los días previos y debido a la escasez de agua en los meses anteriores, el martes 02/04 sería recomendable realizar una aplicación de riego. En cuanto a la fertilización, al no existir deficiencias nutricionales es recomendable no aplicar ningún fertilizante en esta campaña.

5- Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se ha desarrollado una aplicación de fácil manejo, *REUTICVAR*, que permite la programación de un fertirriego de precisión empleando aguas regeneradas. *REUTICVAR* se validó durante la campaña 2018 en una parcela de olivar mostrando que, gracias a los nutrientes incorporados en el agua de riego, no era necesaria ninguna aportación adicional de fertilizante, lo que conlleva una reducción tanto de los costes de producción como el impacto ambiental de la actividad.

La aplicación de *REUTICVAR* muestra que el riego con aguas regeneradas es una alternativa sostenible y rentable para el riego de olivar en Andalucía, pues pone de manifiesto que el uso de este tipo de aguas permite el ahorro de fertilizante, lo que implica importantes beneficios económicos, ambientales y sociales.

6- Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Grupo Operativo REUTIVAR, proyecto de innovación cofinanciado por la Junta de Andalucía y la Unión Europea a través del FEADER 2014-2020, en el marco de las ayudas de la *Línea Olivar* para el funcionamiento de grupos operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI) en materia de productividad y sostenibilidad agrícola.

7- Bibliografía

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2015). AEMET OpenData. Recuperado 14 de febrero de 2019, a partir de http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_OpenData
- Allen, R. G. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. *Irrigation and Drainage*, 300(56), 300.
- Ayoub, S., Al-Shdiefat, S., Rawashdeh, H., & Bashabsheh, I. (2016). Utilization of reclaimed wastewater for olive irrigation: Effect on soil properties, tree growth, yield and oil content. *Agricultural Water Management*, 176, 163-169.

- Bedbabis, S., Ferrara, G., Ben Rouina, B., & Boukhris, M. (2010). Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. *Scientia Horticulturae*, 126(3), 345-350.
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., ... Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81(S1), 71-95.
- Bisselink, B., Bernhard, J., Gelati, E., Adamovic, M., Guenther, S., Mentaschi, L., & De Roo, A. (2018). *Impact of a changing climate, land use, and water usage on Europe's water resources: A model simulation study*.
- Bourazanis, G., Roussos, P. A., Argyrokastritis, I., Kosmas, C., & Kerkides, P. (2016). Evaluation of the use of treated municipal waste water on the yield, oil quality, free fatty acids' profile and nutrient levels in olive trees cv Koroneiki, in Greece. *Agricultural Water Management*, 163, 1-8.
- Bueno-Delgado, M. V., Melenchon-Ibarra, A., & Molina-Martinez, J. M. (2017). Software application for real-time ETo/ETc calculation through mobile devices. *Precision Agriculture*, 18(6), 1024-1037.
- Chen, W., Lu, S., Jiao, W., Wang, M., & Chang, A. C. (2013). Reclaimed water: A safe irrigation water source? *Environmental Development*, 8(1), 74-83.
- CHG - Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (Spanish Government). (2016). Plan Hidrológico de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021, 2015-2021.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage*, 24.
- Erel, R., Eppel, A., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., Levy, G., Zipori, I., ... Dag, A. (2019). Long-term irrigation with reclaimed wastewater: Implications on nutrient management, soil chemistry and olive (*Olea europaea* L.) performance. *Agricultural Water Management*, 213(November 2018), 324-335.
- Erel, R., Kerem, Z., Ben-Gal, A., Dag, A., Schwartz, A., Zipori, I., ... Yermiyahu, U. (2013). Olive (*Olea europaea* L.) tree nitrogen status is a key factor for olive oil quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(47), 11261-11272.
- European Commission. (2018). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse. Recuperado a partir de http://ec.europa.eu/environment/water/pdf/water_reuse_regulation.pdf
- Fereres, E., Pruitt, W. O., Beutel, J. A., Henderson, D. W., Holzapfel, E., Shulbach, H., & Uriu, K. (1981). ET and drip irrigation scheduling. En *Drip Irrigation Management*.
- Fernández-Escobar, R. (2017). Fertilización. En *El Cultivo del Olivo* (pp. 419-460).
- Fernández-Escobar, R. (2018). Trends in olive nutrition. *Acta Horticulturae*, 1199, 215-223.
- Fernández-Escobar, R., Antonaya-Baena, M. F., Sánchez-Zamora, M. A., & Molina-Soria, C. (2014). The amount of nitrogen applied and nutritional status of olive plants affect nitrogen uptake efficiency. *Scientia Horticulturae*, 167, 1-4.
- Fernández-Escobar, R., Beltrán, G., Sánchez-Zamora, M. A., García-Novelo, J., Aguilera, M. P., & Uceda, M. (2006). Olive oil quality decreases with nitrogen over-fertilization. *HortScience*, 41(1), 215-219.
- Fernández-Escobar, R., Marin, L., Sánchez-Zamora, M. A., García-Novelo, J. M., Molina-Soria, C., & Parra, M. A. (2009). Long-term effects of N fertilization on cropping and growth of olive trees and on N accumulation in soil profile. *European Journal of Agronomy*, 31(4), 223-232.
- Fernández-Escobar, R., Navarro, S., & Melgar, J. C. (2011). Effect of Nitrogen Status on Frost Tolerance of Olive Trees. *Acta Horticulturae*, (924), 41-45.
- Fernández-Escobar, R., Parra, M. A., Navarro, C., & Arquero, O. (2009). Foliar diagnosis as a guide to olive fertilization. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(1), 212-223.
- García, J. M., Cuevas, M. V., & Fernández, J. E. (2013). Production and oil quality in «Arbequina» olive (*Olea europaea*, L.) trees under two deficit irrigation strategies. *Irrigation Science*, 31(3), 359-370.
- Gobierno de España. Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el

- régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, Pub. L. No. BOE-A-2007-21092 (2007). Spain.
- González Perea, R., Fernández García, I., Martín Arroyo, M., Rodríguez Díaz, J. A., Camacho Poyato, E., & Montesinos, P. (2017). Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries. *Agricultural Water Management*, 183, 194-201.
- INE, I. N. (2018). Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario. Recuperado a partir de http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176839&menu=ultiDatos&idp=1254735976602
- Mérida García, A., Fernández García, I., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., & Rodríguez Díaz, J. A. (2018). Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *Journal of Cleaner Production*, 175, 670-682.
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., & Fereres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425-431.
- Orgaz, F., & Fereres, E. (2001). El Riego. En Junta de Andalucía & Ediciones Mundiprensa (Eds.), *El Cultivo del Olivo* (6ª, pp. 285-306). Madrid.
- Orgaz, F., Fereres, E., & Testi, L. (2017). El Riego. En *El Cultivo del Olivo* (7ª, pp. 461-490).
- Padilla-Díaz, C. M., Rodríguez-Dominguez, C. M., Hernandez-Santana, V., Perez-Martin, A., & Fernández, J. E. (2016). Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agricultural Water Management*, 164, 28-37.
- Pagán, F. J., Ferrández-Villena, M., Fernández-Pacheco, D. G., Rosillo, J. J., & Molina-Martínez, J. M. (2015). Optifer: An application to optimize fertiliser costs in fertigation. *Agricultural Water Management*, 151, 19-29.
- Parra, M. A. (2017). Suelo. En *El Cultivo del Olivo* (pp. 251-287).
- Pérez-Castro, A., Sánchez-Molina, J. A., Castilla, M., Sánchez-Moreno, J., Moreno-Úbeda, J. C., & Magán, J. J. (2017). cFertigUAL: A fertigation management app for greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 183, 186-193.
- Petousi, I., Fountoulakis, M. S., Saru, M. L., Nikolaidis, N., Fletcher, L., Stentiford, E. I., & Manios, T. (2015). Effects of reclaimed wastewater irrigation on olive (*Olea europaea* L. cv. 'Koroneiki') trees. *Agricultural Water Management*, 160, 33-40.
- Pratap, R. (2017). *Getting started with Matlab. A quick introduction for scientist and engineers*. (Oxford University Press, Ed.) (7th ed.).
- Rallo, L., & Cuevas, J. (2017). Fructificación y producción. En *El Cultivo del Olivo* (7ª, pp. 145-186).
- Ródenas, M. A., & Albacete, M. (2014). The River Segura: reclaimed water, recovered river. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 4(1), 50-57. <https://doi.org/10.2166/wrd.2013.044>
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. US Environmental Protection Agency (EPA), USA.
- Schaap, M. G. (1999). ROSETTA model. *Journal of hydrology*, 251(3), 0-3.
- Segal, E., Dag, A., Ben-Gal, A., Zipori, I., Erel, R., Suryano, S., & Yermiyahu, U. (2011). Olive orchard irrigation with reclaimed wastewater: Agronomic and environmental considerations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(3-4), 454-461.
- Trinh, L. T., Vu, G. N. H., Van Der Steen, P., & Lens, P. N. L. (2013). Climate Change Adaptation Indicators to Assess Wastewater Management and Reuse Options in the Mekong Delta, Vietnam. *Water Resources Management*, 27(5), 1175-1191.
- Troncoso, A., Magán, J. J., Cantos, M., Liñan, J., & Fernández, J. E. (2017). Fertirrigación. En *El Cultivo del Olivo* (pp. 491-517).