



B-02-2023

Comunicación científico-técnica

Mejorando la sostenibilidad del riego en cítricos en contextos de escasez de agua: AquaCitrus como solución innovadora

Boubakri, Najib¹; García-Prats, Alberto¹; Carricondo-Antón, Juan Manuel¹; Jiménez-Bello, Miguel Angel¹; Pulido-Velazquez, Manuel¹.

1 Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, España; nboubak@upv.es

Resumen:

El estrés hídrico es un problema cada vez más grave en muchas partes del mundo, y diversos factores contribuyen a empeorar esta situación. El cambio climático, el aumento de la demanda de agua debido al crecimiento poblacional e industrial, el incremento del coste de la energía son solo algunos de los desafíos que afectan negativamente la producción agraria y la seguridad alimentaria. Entre todos los sectores que consumen agua dulce, la agricultura se destaca como el principal, representando aproximadamente el 70% del consumo total. La escasez de agua y los efectos del cambio climático representan desafíos significativos para la agricultura especialmente en regiones áridas y semiáridas, como gran parte de la cuenca mediterránea, donde se cultivan principalmente cultivos leñosos que requieren una cantidad significativa de agua, como es el caso de los cítricos.

Ante este panorama, resulta imprescindible desarrollar medidas y herramientas de ayuda a la toma de decisiones que permitan aumentar la eficiencia en el uso del agua en estos cultivos. Es necesario mejorar la gestión hídrica para optimizar los rendimientos de los cultivos y minimizar el desperdicio de agua. El desarrollo de modelos y herramientas de simulación agronómica se presenta como una solución prometedora.

En este contexto, nuestro estudio se centra en el desarrollo de AquaCitrus, un modelo de balance hídrico en suelo diseñado específicamente para los cultivos de cítricos. AquaCitrus tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia del riego al simular los flujos de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, considerando factores como la precipitación efectiva, la infiltración, la escorrentía, la evaporación del suelo, el drenaje y la transpiración del cultivo teniendo en cuenta aspectos como la heterogeneidad del suelo. La aplicación de AquaCitrus permite realizar una gestión más precisa y eficiente del agua de riego, optimizando la cantidad de agua suministrada a los cultivos de cítricos. Esto no solo contribuye a reducir el estrés hídrico en estas regiones, sino que también ayuda a



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



simular escenarios de cambio climático con el objetivo de mitigar sus efectos y garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola.

Para evaluar la capacidad predictiva de AquaCitrus, el modelo ha sido evaluado en parcelas localizadas en Picassent (Comunidad Valenciana) utilizando datos de humedad del suelo durante un período de dos años (2015-2016). Los resultados mostraron una alta concordancia entre los valores simulados y observados del contenido de agua en diferentes profundidades del suelo, con un coeficiente de determinación R^2 que varía entre 0.78 y 0.91, lo que confirma la precisión del modelo en la predicción del balance hídrico en los cultivos de cítricos. Además, este modelo ofrece oportunidades para mejoras futuras y su aplicación en diferentes contextos de citricultura en regiones áridas y semiáridas.

En conclusión, el desarrollo de herramientas de toma de decisiones, como AquaCitrus, es esencial para abordar los desafíos relacionados con el estrés hídrico en la agricultura, especialmente en cultivos leñosos como los cítricos en regiones áridas y semiáridas. Estas herramientas permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua, optimizando la gestión del riego y contribuyendo a la sostenibilidad de la producción agrícola en un contexto de cambio climático y aumento de la demanda de agua.

Palabras clave: Estrés hídrico; Eficiencia del uso de agua, Modelización agronómica, Necesidades hídricas, Cítricos.

Enhancing citrus irrigation sustainability in water-scarce conditions: AquaCitrus as an innovative solution

Boubakri, Najib¹; García-Prats, Alberto¹; Carricondo-Antón, Juan Manuel¹; Jiménez-Bello, Miguel Angel¹; Pulido-Velazquez, Manuel¹.

¹ Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, España; nboubak@upv.es

Abstract:

Water stress is a significant and growing concern for agriculture in many parts of the world, and the situation is expected to worsen as various factors exacerbate it. Climate change, increasing water demand due to population and industrial growth, and energy price increasing are significant challenges affecting agricultural production and food security. Agriculture stands out as the primary consumer of all sectors consuming freshwater, accounting for approximately 70% of total water use. Water scarcity and the derived effects of climate change pose significant challenges to agriculture, especially in arid and semi-arid regions, such as a large part of the Mediterranean basin, where woody crops, like citrus, requiring substantial water, are predominantly cultivated.

Facing this situation, it is essential to develop measures and decision-support tools to enhance water-use efficiency in agriculture, especially in woody crops. Improving water management is crucial for optimizing crop yields and minimizing water losses. The development of agronomic simulation models and tools emerges as a promising solution.

In this context, our study focuses on the development of AquaCitrus, a soil water balance model designed explicitly for citrus cultivation. AquaCitrus's primary objective is to enhance irrigation efficiency by simulating water fluxes within the soil-plant-atmosphere system, considering effective precipitation, infiltration, runoff, soil evaporation, drainage, and crop transpiration while addressing soil heterogeneity. Applying AquaCitrus enables more precise and efficient irrigation water management, optimizing the amount supplied to citrus crops. This model not only contributes to reducing water stress in water-scarce regions but also helps simulate climate change scenarios to mitigate their effects and ensure the sustainability of agricultural production.

To assess AquaCitrus's predictive capacity, the model was evaluated in citrus cultivation orchards located in Picassent, Valencia (Spain), using soil moisture data over a two-year period (2015-2016). The results demonstrated a high level of agreement between simulated and observed soil water content at different soil depths, with R^2 varying between 0.78 and 0.91, confirming the model's accuracy in predicting the water balance in citrus crops. Furthermore, this model offers opportunities for future improvements and its application in various citrus farming contexts in arid and semi-arid regions.



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



In conclusion, developing decision-support tools like AquaCitrus is indispensable for addressing water stress-related challenges in agriculture, especially in woody crops like citrus in arid and semi-arid regions. These tools facilitate improvements in water-use efficiency, optimize irrigation management, and contribute to the sustainability of agricultural production in the face of climate change and increasing water demand.

Keywords: Water stress, Water use efficiency, Agronomic modeling, Water requirements, Citrus.

1. Introducción

La escasez de agua representa un desafío significativo a nivel mundial, especialmente en regiones áridas y semiáridas, como gran parte de la cuenca mediterránea [1]. En estas áreas, la deficiencia de agua se acentúa durante ciertas estaciones, resaltando la importancia crítica de los recursos hídricos, en particular en la agricultura de riego [2]. Múltiples factores contribuyen a la escasez de agua como el crecimiento de la población que genera una alta demanda en agua, la industrialización y los derivados del cambio climático. Asimismo, las proyecciones futuras del cambio climático indican un aumento en la frecuencia y severidad de las sequías en la cuenca mediterránea [3]. Esta región se caracteriza por cultivos perennes, entre ellos, los cítricos (*Citrus sinensis*), que son altamente vulnerables a la escasez de agua. Los cítricos, que ya son cultivos intensivos en agua, enfrentan una presión adicional debido a los cambios en los patrones de lluvia y el aumento de las temperaturas, lo que resulta en tasas de evapotranspiración más altas y una mayor demanda de riego [4-5].

Los cítricos son uno de los principales cultivos frutales que cubren extensas áreas agrícolas a nivel mundial [6]. En particular, el sector cítrico es de gran relevancia en el sistema agroalimentario español y se destaca como líder en los mercados internacionales de exportación. Dentro de la categoría de frutas y hortalizas, los cítricos se encuentran entre los productos más destacados tanto por su volumen de producción como por su comercialización. España, con una superficie de 307,343 hectáreas y una producción de aproximadamente 7 millones de toneladas anuales, lidera en la Unión Europea con alrededor del 56% de la producción total, superando notablemente a Grecia e Italia [7].

Las regiones más productivas de cítricos en España se localizan en el sureste del país, abarcando Andalucía, Murcia y Valencia [7]. Estas regiones productoras se caracterizan por su clima semiárido, con precipitaciones medias anuales que no superan los 500 mm [8]. Además, estas zonas enfrentan escasez de agua y periodos de sequía. Por otro lado, el cultivo de cítricos es altamente demandante de agua, consumiendo alrededor de 8,000 m³/ha/año, depende de factores como variedad del cultivo de cítricos y condiciones edafoclimáticas [5].

Por lo tanto, la optimización de la eficiencia en el uso del agua en el riego de este cultivo reviste una gran importancia. Para lograr una gestión eficiente de los recursos hídricos, mitigar los efectos de la sequía y adaptarse al cambio climático en regiones áridas y semiáridas que dependen en gran medida del riego, resulta crucial desarrollar medidas que mejoren la capacidad, eficiencia y resiliencia del uso de agua [6-9]. Las herramientas de ayuda a la toma de decisiones, en particular los modelos de simulación de cultivos desempeñan un papel fundamental en la predicción y gestión del impacto de la escasez de agua y el cambio climático en la gestión del riego [2-10].

En este estudio, nos enfocamos en la colmatación de una notable carencia en la modelización agronómica con el desarrollo de un modelo especializado para cultivos leñosos, con un énfasis

particular en los árboles cítricos. Aunque existen numerosos modelos agronómicos para cultivos anuales, la disponibilidad de modelos adaptados a cultivos leñosos es limitada. Se han desarrollado diversos modelos para el cultivo de cítricos, como SWAP [11] e IManSys [6]. No obstante, cada uno de estos modelos presenta restricciones, como la falta de consideración de la heterogeneidad del suelo, entre otras. Nuestro modelo, AquaCitrus, se presenta como un modelo funcional de balance hídrico en el suelo para cítricos. Opera en un paso de tiempo diario, simulando los flujos de agua dentro del sistema suelo-planta-atmósfera. AquaCitrus incorpora diversos submódulos para calcular procesos hídricos esenciales, como la precipitación efectiva, la infiltración, la escorrentía, la evaporación del suelo, el drenaje y la transpiración del cultivo. Es importante destacar que el modelo considera la interceptación de la lluvia por el dosel y calcula por separado la evaporación del suelo y la transpiración de los cítricos. Reconociendo la heterogeneidad de la humedad del suelo resultante de las prácticas de riego localizado, AquaCitrus divide el suelo en dos compartimentos y cada compartimento se divide en capas, lo que permite realizar cálculos separados del balance hídrico para cada zona del suelo, ya sea húmeda o seca.

En este documento se presenta una descripción del nuevo modelo AquaCitrus, seguido de una evaluación su capacidad y su aplicabilidad en diversos contextos de cultivo de cítricos en regiones áridas y semiáridas.

2. Materiales y métodos (Trabajo de innovación: descripción de la innovación)

2.1. Descripción general del modelo

El modelo AquaCitrus se ha desarrollado tomando como base los enfoques y conceptos utilizados en el reconocido modelo AquaCrop desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 2009 [12-14]. Sin embargo, AquaCrop está principalmente diseñado para cultivos vegetativos y anuales, por lo que no considera las características específicas de los cultivos perennes y leñosos como los cítricos. Además, el modelo solo está disponible de manera limitada como un producto de software compilado. Adicionalmente, AquaCrop no considera algunas especificaciones, como la heterogeneidad del suelo.

AquaCitrus, por otro lado, ha sido desarrollado específicamente para abordar estas limitaciones. Escrito en el lenguaje de programación R, AquaCitrus opera en un intervalo de tiempo diario y simula los flujos de agua dentro del complejo suelo-planta-atmósfera en huertos de cítricos. Este modelo incluye datos de entrada sobre propiedades del suelo, sistema de riego, características del cultivo y datos meteorológicos. El modelo incorpora varias funciones y características nuevas que amplifican su precisión y aplicabilidad, garantizando simulaciones sólidas y holísticas. Como ejemplo, el modelo tiene en cuenta la interceptación de la lluvia por el dosel, un componente esencial en el modelo de balance hídrico. Además, calcula por separado la evaporación del suelo y la transpiración de los cítricos. La evaporación del suelo se determina utilizando el modelo de Ritchie [14], mientras que la transpiración de los cítricos se estima utilizando el método del coeficiente de transpiración [15]. AquaCitrus

también reconoce la heterogeneidad del suelo, ya que el riego localizado mantiene una pequeña parte del suelo constantemente húmeda mientras que el resto permanece seco a menos que llueva. En consecuencia, el modelo se divide en dos compartimentos, lo que permite realizar cálculos separados del balance hídrico para cada zona del suelo, húmeda y seca. Esta técnica de separación de dos fracciones de suelo, húmeda y seca, ha sido implementada en varios estudios, como los estudios realizados por [16] y [17].

Además, el modelo incluye una función para simular el rendimiento en función de la productividad del agua.

La Figura 1 presenta la interfaz del modelo con los datos de entrada (clima, cultivo, suelo y manejo del agua) y los datos de salida en formato de tablas y gráficos. Los datos de salida representan los flujos del balance de agua tanto en intervalos diarios como en forma acumulativa.

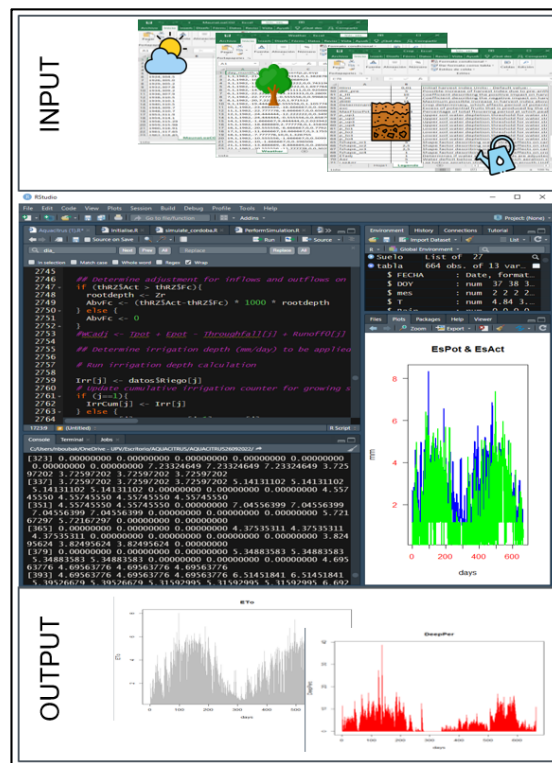


Figura 1. Interfaz del modelo AquaCitrus.

2.2. Evaluación del modelo

Con el objetivo de evaluar la capacidad del modelo para proporcionar resultados precisos y consistentes, se llevó a cabo una evaluación de AquaCitrus utilizando datos de humedad del suelo de dos campañas de riego (2015-2016) procedentes de unas parcelas experimentales de cítricos ubicadas en Picassent, Valencia (España). La zona se caracteriza por un clima mediterráneo semiárido [8]. Las parcelas están plantadas con dos variedades, Navelina (*Citrus sinensis navel*) y Navel Lane Late (*Citrus sinensis* (L) Osbeck), con un marco de plantación de 5m x 5m. Estas parcelas fueron irrigadas por goteo con una doble línea que dispone de 10 goteros

de 4 L h⁻¹ por árbol. El suelo presentaba una textura franco arenosa, con una proporción de piedras del 18% en peso.

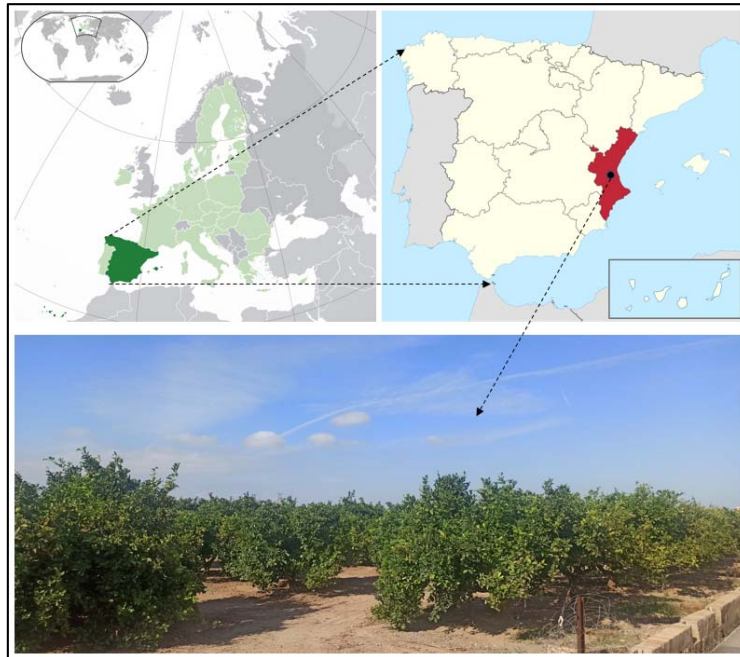


Figura 2. Ubicación de las parcelas de cítricos utilizadas para la evaluación del modelo AquaCitrus

En las parcelas seleccionadas, se instalaron dos sondas capacitivas destinadas a la monitorización de la humedad del suelo. Una de estas sondas fue ubicada en la zona del bulbo húmedo del suelo, mientras que la otra se posicionó en la zona seca. A través de la implementación de estas sondas, se logró obtener registros de la humedad del suelo a diversas profundidades, incluyendo los niveles de 10 cm, 30 cm, 50 cm y 70 cm, que son los medios de cuatro capas que tienen un espesor de 20 cm cada una. Estos registros se obtuvieron con una frecuencia de muestreo de 5 minutos y durante los años 2015 y 2016.

3. Resultados y discusión

La siguiente figura 3 muestra una comparación entre el contenido de agua en suelo simulado y observado en varias profundidades, 10 cm, 30 cm, 50 cm y 70 cm. Los resultados destacan una concordancia significativa entre los valores simulados y los datos medidos, lo que confirma la capacidad del modelo para predecir de manera precisa el balance hídrico en parcelas de cítricos.

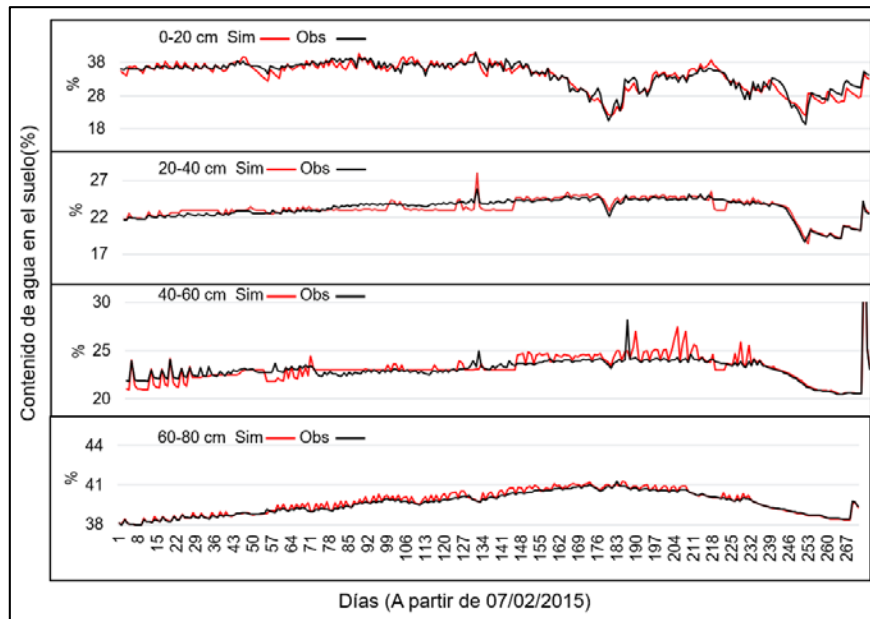


Figura 3. Comparación entre contenido de agua en el suelo simulado y observado a distintas Profundidades: 10 cm, 30 cm, 50 cm y 70 cm

Incluso, al analizar los parámetros estadísticos, coeficiente de determinación (R^2) y el índice de Willmott (d), se evidencia la alta capacidad del modelo para reproducir de manera precisa los datos observados. Los resultados revelan valores de R^2 que oscilan entre 0.78 y 0.91 en distintas profundidades del suelo y el índice de Willmott muestra un valor mínimo de 0.74, que corresponde a la tercera capa del suelo. Esto resultados indican una fuerte correlación entre las simulaciones del modelo y las mediciones reales, confirmando la confiabilidad y el rendimiento del modelo AquaCitrus en la predicción del contenido de agua en el suelo en diferentes profundidades y la simulación del balance hídrico para cítricos.

Tabla 1. Parámetros estadísticos usados, coeficiente de determinación (R^2) y índice de Willmott (d) para evaluar el desempeño del modelo AquaCitrus.

Índices estadísticos	R^2	d
Profundidad 10 cm	0,89	0,80
Profundidad 30 cm	0,85	0,78
Profundidad 50 cm	0,78	0,74
Profundidad 70 cm	0,91	0,82

Además del contenido de agua en el suelo, también se evaluaron otros parámetros, como la evapotranspiración del cultivo (ETc). En la Figura 4, se presenta una comparación entre la evapotranspiración simulada y la evapotranspiración observada, utilizando datos de investigación proporcionados por el [Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias \(IVIA\)](#) [18], en un estudio realizado en condiciones similares a las de las parcelas de este estudio. Los

resultados muestran una alta concordancia entre los valores simulados y observados, con un R2 de 0.86.

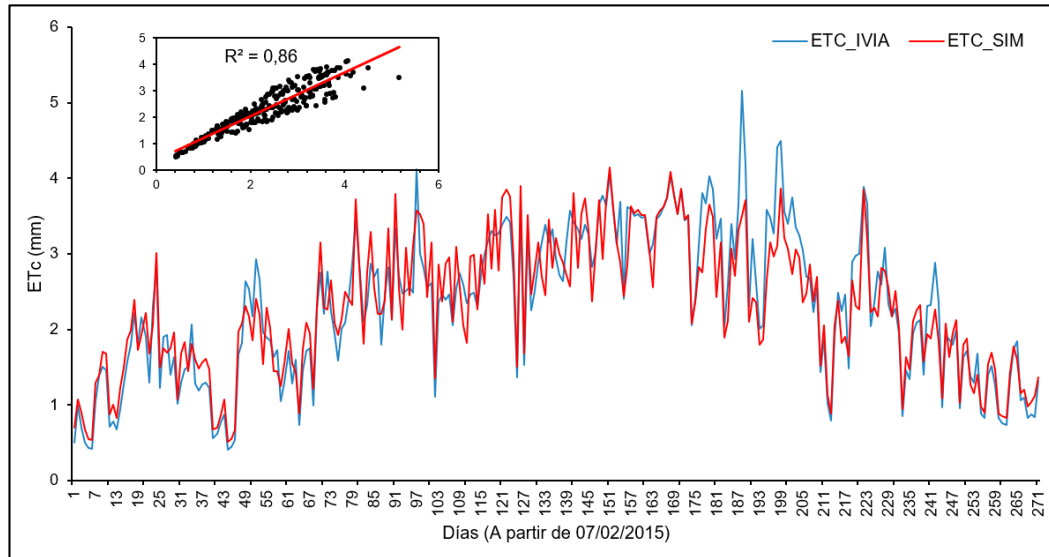


Figura 4. Comparación entre la evapotranspiración del cultivo obtenida con AquaCitrus (ETc_Sim) y la ETc de las estaciones agroclimáticas SIAR del Instituto Valenciano de Investigación Agraria (IVIA)

Es importante señalar que los resultados presentados en este documento representan una parte de los hallazgos obtenidos en el marco de este estudio. Estos resultados se ofrecen a título de ejemplo y muestran la capacidad del modelo AquaCitrus para simular el balance de agua en cultivos de cítricos teniendo en cuenta varios factores y condiciones específicas. El estudio completo abarca un análisis más detallado que incluye una descripción profunda y una evaluación exhaustiva del modelo, lo que brinda una visión integral de la aplicabilidad y robustez del modelo en diversas situaciones agronómicas.

4. Conclusiones

Mediante el desarrollo de AquaCitrus y la evaluación de su desempeño, este estudio contribuye al avance de las herramientas de toma de decisiones para la gestión de riego hídricos en regiones áridas y semiáridas. Con su capacidad para mejorar y optimizar las prácticas de riego en cítricos, AquaCitrus ofrece una herramienta práctica para abordar los desafíos del cambio climático, la escasez de agua y el uso sostenible del agua en la agricultura. Los hallazgos de este estudio brindan conocimientos valiosos sobre el potencial de la modelización agronómica para impulsar estrategias de riego eficientes y resilientes en la producción de cítricos, allanando el camino para prácticas mejoradas de gestión del agua en medio de un futuro caracterizado por la incertidumbre.

5. Agradecimientos

Este estudio ha sido apoyado por el proyecto ADAPTAMED (RTI2018-101483-B-I00), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) de España, incluyendo fondos del FEDER de la Unión Europea; por el proyecto GoNEXUS (GA. 101003722), financiado por el Programa Horizonte de la Unión Europea, convocatoria H2020-LC-CLA-

2018-2019-2020; y por el proyecto WATER4CAST (PROMETEO/2021/074) financiado por la Generalitat Valenciana a través de la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital.

Referencias

- [1] V. Masson-Delmotte et al., "IPCC, 2018: summary for policymakers, global warming of 1.5° C," An IPCC Special Report on the impacts of global warming of, vol. 1, 2018.
- [2] I. J. Lorite et al., "Evaluation of olive response and adaptation strategies to climate change under semi-arid conditions," *Agric Water Manag*, vol. 204, pp. 247–261, 2018.
- [3] J.-Y. Lee et al., "Future global climate: scenario-based projections and near-term information," in *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, 2021, pp. 553–672.
- [4] C. Ballester, M. A. Jiménez-Bello, J. R. Castel, and D. S. Intrigliolo, "Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees," *Agric For Meteorol*, vol. 168, pp. 120–129, 2013.
- [5] D. Balfagón, V. Arbona, and A. Gómez-Cadenas, "The future of citrus fruit: The impact of climate change on citriculture," *Metode Sci Stud J*, no. 12, pp. 123–129, 2022.
- [6] A. Fares, H. K. Bayabil, M. Zekri, D. Mattos-Jr, and R. Awal, "Potential climate change impacts on citrus water requirement across major producing areas in the world," *Journal of Water and Climate Change*, vol. 8, no. 4, pp. 576–592, 2017.
- [7] Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (MAPA), "Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España." Accessed: Sep. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>
- [8] A. Garcia-Prats, J. M. Carricondo-Anton, M. A. Jiménez-Bello, J. M. Juárez, E. López-Pérez, and M. Pulido-Velazquez, "Dynamic procedure for daily PM56 ETo mapping conducive to site-specific irrigation recommendations in areas covered by agricultural weather networks," *Agric Water Manag*, vol. 287, p. 108415, 2023.
- [9] M. Moriondo et al., "A simple model simulating development and growth of an olive grove," *European Journal of Agronomy*, vol. 105, pp. 129–145, 2019.
- [10] T. Foster et al., "AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model," *Agric Water Manag*, vol. 181, pp. 18–22, 2017.
- [11] E. Martínez-Ferri, J. L. Muriel-Fernández, and J. A. R. Díaz, "Soil water balance modelling using SWAP: An application for irrigation water management and climate change adaptation in citrus," *Outlook Agric*, vol. 42, no. 2, pp. 93–102, 2013.
- [12] D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres, "AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description," *Agron J*, vol. 101, no. 3, pp. 438–447, 2009.
- [13] P. Steduto, T. C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres, "AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles," *Agron J*, vol. 101, no. 3, pp. 426–437, 2009.
- [14] J. T. Ritchie, "Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover," *Water Resour Res*, vol. 8, no. 5, pp. 1204–1213, 1972.



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



-
- [15] R. G. Allen and L. S. Pereira, "Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height," *Irrig Sci*, vol. 28, pp. 17–34, 2009.
- [16] Á. López-Bernal et al., "OliveCan: a process-based model of development, growth and yield of olive orchards," *Front Plant Sci*, vol. 9, p. 632, 2018.
- [17] L. Testi, F. J. Villalobos, F. Orgaz, and E. Fereres, "Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis," *Irrig Sci*, vol. 24, pp. 69–76, 2006.
- [18] M. Á. Jiménez-Bello, J. R. Castel, L. Testi, and D. S. Intrigliolo, "Assessment of a remote sensing energy balance methodology (SEBAL) using different interpolation methods to determine evapotranspiration in a citrus orchard," *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 8, no. 4, pp. 1465–1477, 2015.