

B-08-2023

Comunicación científico-técnica

Algoritmo para la programación automática del riego en cítricos mediante variables suelo-atmósfera

Cámara, E.¹; Bonet, L.¹; Pérez-Pérez, J.G.²; Tasa, M.²; Martínez -Gimeno, M.A.²

- 1 Servicio de Tecnología del Riego, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (STR-IVIA), *riegosivia@gva.es
- 2 Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible, IVIA (CDAS-IVIA), CV-315, km 10,7, Moncada, Valencia.

Resumen: El sector dispone de una amplia gama de dispositivos para la programación del riego, pero la interpretación de la información puede ser una tarea compleja. El éxito de las nuevas tecnologías reside en el desarrollo de programadores con capacidad de interpretación automatizada de la información. El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el uso de nuevos algoritmos de cálculo (Modelo) para programación del riego en una parcela comercial de cítricos. La metodología propone una programación del riego para una semana concreta (NR_s) mediante corrección de la programación de la semana previa (NR_{s-1}) mediante dos coeficientes. Por un lado, un coeficiente basado en la información de sondas de humedad del suelo (k_θ) y, por otro lado, un coeficiente basado en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) según Hargreaves-Samani (k_{ET_0}) a partir de dos fuentes: i) los registros históricos del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (Red SiAR); y, ii) la integración de previsiones meteorológicas proporcionadas por la AEMET. El procedimiento de programación del riego descrito se ha validado en la campaña 2022-23 en una parcela comercial de naranjo Valencia cv. 'Midknight' en Pedralba (Valencia). Los tratamientos de riego aplicados fueron: i) Control, regado considerando el 100% ET_c ajustado por un técnico; ii) Modelo $k_\theta+k_{ET_0-hist}$ (ModeloH) y, iii) Modelo $k_\theta+k_{ET_0-prev}$ (ModeloP). Los modelos se aplicaron a partir del 23 de mayo de 2022 (semana 21 de 2022) hasta recolección, el 11 de abril de 2023 (semana 15 de 2023). En la aplicación de los nuevos modelos, el coeficiente derivado de la humedad del suelo (k_θ) presentó un comportamiento similar. Sin embargo, k_{ET_0} mostró un comportamiento diferencial. En el ModeloH, el k_{ET_0-hist} reflejó de manera más precisa las variaciones en la ET_0 semanal acumulada, mientras que el ModeloP, el k_{ET_0-prev} generó una infraestimación de este parámetro, motivado por la propia metodología asociada a su cálculo. De este modo, las dosis de riego aplicadas fueron de 443 mm para el Control, 466 mm para el ModeloH (+7,6% Control) y 305 mm en el ModeloP (-31 % Control). La menor dosis de riego derivada de la aplicación del ModeloP, ocasionó durante las etapas de crecimiento del fruto un descenso importante de la humedad en el suelo. El estrés hídrico sufrido tuvo un impacto negativo sobre el rendimiento, debido a un menor peso del fruto. En el caso del ModeloH, las estimaciones se ajustaron mucho más a la programación del riego del tratamiento Control.

Palabras clave: Modelo predictivo, sondas de humedad, estación agrometeorológica, predicción climática.

Algorithm for automatic irrigation scheduling in citrus using soil-atmosphere variables

Cámara, E.¹; Bonet, L.¹; Pérez-Pérez, J.G.²; Tasa, M.²; Martínez -Gimeno, M.A.²

- 1 Servicio de Tecnología del Riego, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (STR-IVIA), *riegosivia@gva.es
- 2 Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible, IVIA (CDAS-IVIA), CV-315, km 10,7, Moncada, Valencia.

Abstract: The sector has a wide range of devices for irrigation scheduling, but interpreting the information can be complex. The success of new technologies lies in the development of schedulers with automated information interpretation capabilities. The objective of this study was to evaluate the use of new calculation algorithms (Model) for irrigation scheduling in a commercial citrus orchard. The methodology is based on proposing an irrigation scheduling for a specific week (IWN) by correcting the one from the previous week (IWN_{w-1}) using two coefficients. On one hand, a coefficient based on soil moisture probe data (k_{θ}), and on the other hand, a coefficient based on the estimation of reference evapotranspiration (ET_0) according to Hargreaves-Samani (k_{ET_0}) from two sources: i) historical data from the Agroclimatic Information System for Irrigation (Red SiAR); and, ii) the integration of weather forecasts data provided by the National Meteorological Agency (AEMET). The described irrigation scheduling procedure was validated in the 2022-23 season in a commercial plot of 'Midnight' Valencia orange in Pedralba (Valencia). The applied irrigation treatments were: i) Control, irrigated considering 100% ET_c adjusted by a technician; ii) Model $k_{\theta}+k_{ET_0-hist}$ (ModelH), and iii) Model $k_{\theta}+k_{ET_0-prev}$ (ModelP). The models were applied from May 23, 2022 (week 21, 2022) until harvest on April 11, 2023 (week 15, 2023). In the application of the new models, the soil moisture-derived coefficient (k_{θ}) exhibited similar behaviour. However, k_{ET_0} showed differential behaviour. In ModelH, k_{ET_0-hist} reflected more accurately variations in weekly accumulated ET_0 , while in ModelP, k_{ET_0-prev} underestimated this parameter due to the methodology associated with its calculation. Thus, the irrigation doses applied were 443 mm for the Control, 466 mm for ModelH (+7.6% compared to Control), and 305 mm in ModelP (-31% compared to Control). The lower irrigation dose resulting from the application of ModelP caused a significant decrease in soil moisture during fruit growth stages. The water stress suffered had a negative impact on yield due to reduced fruit weight. In the case of ModelH, the estimates closely matched the irrigation schedule of the Control treatment.

Keywords: Predictive model, soil moisture probes, agrometeorological station, climate prediction.

1. Introducción

En la actualidad, el cultivo de los cítricos, al igual que otros cultivos leñosos, muestra una tendencia creciente hacia la intensificación, lo que conlleva a la necesidad de la optimización del riego [1]. En climas semiáridos, donde los periodos de sequía son más frecuentes, el ahorro de agua e insumos es de vital importancia para lograr una intensificación sostenible, destacando así el papel fundamental del riego de precisión en la agricultura mediterránea [2].

En este contexto, la estimación precisa de las necesidades de riego se convierte en un componente esencial. Aunque la metodología de Balance de Agua (FAO 56) es ampliamente utilizada para el cálculo de las necesidades hídricas [3], la incorporación de herramientas digitales de apoyo es crucial para conseguir una programación del riego más eficiente. Los últimos estudios se orientan hacia el uso de nuevos modelos y algoritmos que permitan estimar las necesidades hídricas de los cultivos con el apoyo de tecnologías como los sensores de humedad del suelo [4] o las previsiones meteorológicas [5].

Sin embargo, estas nuevas tecnologías son más accesibles para grandes explotaciones, que cuentan con técnicos especializados, mientras que los pequeños agricultores, que representan la mayoría de la agricultura europea [6], encuentran barreras en su adopción debido a los altos costos y la complejidad en la gestión e interpretación de la información. En este sentido, el proyecto PRIMA “HANDYWATER” está enfocado en desarrollar nuevas soluciones asequibles y de fácil uso para fomentar la adopción de estas herramientas por parte de los pequeños agricultores. En este proyecto se están desarrollando nuevos algoritmos para implementar sistemas de interpretación automatizada de datos, capaces de procesar grandes volúmenes de información de manera eficiente y precisa, facilitando así, la toma de decisiones en la programación del riego.

El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el uso de los nuevos algoritmos de cálculo (modelos), desarrollados en el marco del proyecto europeo “HANDYWATER”, para ayudar a la programación del riego en parcela utilizando tecnologías “low-cost”. Para ello se han comparado tres métodos de programación del riego: uno convencional basado en el método Penman-Monteith FAO 56, y dos nuevos algoritmos que utilizan la información de los sensores de humedad del suelo y/o las previsiones meteorológicas.

2. Materiales y métodos

2.1 Parcela experimental

El estudio se llevó a cabo durante un ciclo de cultivo, entre el 15 de abril de 2022 y el 14 de abril de 2023, en una parcela comercial perteneciente a la cooperativa La Rural San Vicent Ferrer de Benaguacil Coop. V. , ubicada en el término municipal de Pedralba (Valencia). Para ello se dispuso de una parcela de 1,6 ha de naranjos de 5 años, variedad Valencia ‘Midknight’, injertados sobre patrón *Citrus macrophylla* en un marco de plantación de alta densidad de 5×2 m (1.000 árboles por hectárea). El suelo de la parcela se caracterizaba por tener una textura franco-arcillosa (44% de arena, 28% de arcilla, 28% de limo) y un contenido de materia orgánica del 1,43%. El agua de riego procedente de pozo tenía una conductividad eléctrica de 1,16 dS m⁻¹ y un pH de 7,7. El sistema de riego utilizado consistió en dos líneas portagoteros, separadas 0,75 m del tronco, con goteros integrados y autocompensantes de 1,75 L h⁻¹, dispuestos cada 0,5 m.

En la parcela experimental se establecieron 3 tratamientos de riego: Control y 2 modelos de programación del riego (ModeloH y ModeloP). En el caso del tratamiento Control, la programación del riego se realizó partiendo de la dosis teórica basada en el método FAO 56, utilizando los datos agrometeorológicos de la estación de Pedralba (Valencia) de la red SIAR, a través de la plataforma de <http://riegos.ivia.es/>, ajustando la programación semanal para mantener la humedad a 30 cm (zona radicular) en niveles adecuados y evitar pérdidas por drenaje. Los modelos de programación del riego se detallan a continuación.

2.2 Descripción de los modelos

En este estudio se pretenden evaluar dos modelos para calcular las necesidades de riego de una semana determinada $NR_{(s)}$ a partir de un factor k_i vinculado al continuo suelo-planta-atmósfera que corrija, en su caso, la programación de riego aplicada durante la semana inmediatamente anterior $NR_{(s-1)}$:

$$NR_{(s)} = NR_{(s-1)} \times k_i$$

El factor k_i incluye dos ajustes, uno referente al estado hídrico del suelo (k_θ) y otro referente a las condiciones ambientales (k_{ET_0}), según se indica en la siguiente ecuación:

$$k_i = k_\theta \times k_{ET_0}$$

Factor basado en el contenido de humedad – k_θ

Este factor pretende estimar automáticamente las necesidades de riego corrigiendo, si es necesario, las dosis aplicadas en el período de programación previo. El objetivo es restituir el contenido de humedad del suelo (θ) hasta un nivel que se considere óptimo para la fase fenológica del cultivo en cuestión ($\theta_{cultivo}$).

Debido a que los sensores de humedad se ven afectados por factores específicos como la presencia de bolsas de aire en el proceso de instalación, labores de manejo del suelo que modifican su densidad aparente y su contenido en materia orgánica, así como condiciones intrínsecas de éste como textura y estructura, se opta por evitar valores absolutos de humedad procedentes de la calibración de fábrica de los sensores y emplear los valores relativos. De este modo se define el contenido relativo de humedad del suelo (CRH) como:

$$CRH = \frac{\theta}{\theta_{CC}}$$

siendo θ el contenido de humedad observado y θ_{CC} los valores de humedad a capacidad de campo.

De manera equivalente, se determina el CRH del cultivo según la siguiente ecuación:

$$CRH_{cultivo} = \frac{\theta_{cultivo}}{\theta_{CC}}$$

Por último, el coeficiente corrector se obtiene comparando el contenido de humedad mínimo alcanzado en el período previo de programación (CRH_n), en este caso, la semana

anterior, con el mencionado $CRH_{cultivo}$ que concuerda con el óptimo de programación. Por tanto, el factor basado en el estado hídrico del suelo se calcula según la siguiente ecuación:

$$k_{\theta} = \frac{CRH_{cultivo}}{CRH_n}$$

Factor basado en las condiciones ambientales - k_{ET_0}

Las variaciones de la ET_0 representan la influencia de las condiciones meteorológicas y nos proporcionan información de la demanda evapotranspirativa que sufre el cultivo. Para su estimación se ha optado por utilizar el método de Hargreaves-Samani (HS) [3] puesto que garantiza un proceso sencillo, práctico y accesible a todos los usuarios, ya que solo necesita valores observados de temperatura. Este factor corrector se ha definido considerando dos enfoques: el primero se considera la variación de la ET_0 comparando ET_0 prevista con la observada (k_{ET_0-prev}) y un segundo con información meteorológica histórica (k_{ET_0-hist}).

i) k_{ET_0-prev} , donde la ET_0 prevista en el período de programación (ET_{0s}) se compara con la ET_0 observada durante la semana previa a la programación (ET_{0s-1}). Para el cálculo de la ET_0 prevista, se emplean estimaciones a 7 días proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). El procedimiento contempla que las previsiones son recopiladas semanalmente mediante protocolo FTP en un fichero con formato grib. De esta información se extraen los datos de temperatura media, máxima y mínima diaria, que son utilizados para calcular la ET_0 prevista mediante el método de HS. El cálculo de la ET_0 observada recurre a datos procedentes de la estación meteorológica instalada en parcela.

$$k_{ET_0-prev} = \frac{ET_{0s}}{ET_{0s-1}}$$

ii) k_{ET_0-hist} , donde la ET_0 histórica procedente de la información meteorológica histórica correspondiente a la semana de programación (ET_{0s}) se compara con la ET_0 histórica correspondiente a la semana previa (ET_{0s-1}). Para el cálculo de la ET_0 histórica, se emplean los datos de la estación agrometeorológica de la red SIAR más próxima a la parcela. En este caso se dispuso de un histórico de temperaturas máximas, medias y mínimas diarias de una serie de 20 años. Una vez calculada la ET_0 con datos históricos, el factor de variación semanal se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$k_{ET_0-hist} = \frac{ET_{0s}}{ET_{0s-1}}$$

Por lo tanto, los algoritmos utilizados para el cálculo de las necesidades hídricas de riego semanales ($NR_{(s)}$) en cada uno de los modelos evaluados quedan de la siguiente forma:

- **ModeloH**, que considera la información de los sensores de humedad del suelo (k_{θ}) y los valores históricos de la ET_0 según HS (k_{ET_0-hist}):

$$k_i = k_{\theta} \times k_{ET_0-hist}$$

- **ModeloP**, que considera la información de los sensores de humedad del suelo (k_{θ}) y las previsiones meteorológicas para el cálculo de la ET_0 según HS (k_{ET_0-prev}):

$$k_i = k_{\theta} \times k_{ET_0-prev}$$

2.3 Validación de los modelos en campo

Los modelos evaluados (ModeloH y ModeloP) se aplicaron desde el 23 de mayo de 2022 hasta recolección, el 11 de abril de 2023. Para el control del estado hídrico del suelo, se instalaron 2 sensores de humedad de bajo coste (mod. TEROS 10, METER) por tratamiento, ubicados a 5 cm del gotero y a 30 cm de profundidad, siguiendo las recomendaciones del STR-IVIA [7]. Se emplearon árboles distintos en cada caso, pero representativos de la parcela. Los sensores se vincularon a un registrador de datos (mod. ZL6, METER), que almacenaba y transfería los datos vía GPRS a la plataforma Zentra Cloud. Para la obtención de los datos climáticos, se dispuso en la parcela de una estación agroclimática (mod. Davis Vantage Pro, DAVIS).

Para la evaluación de los diferentes tratamientos de riego, se aplicó un diseño de bloques al azar, formado por 4 bloques por tratamiento. Cada bloque estaba formado por 3 filas de árboles con 20 árboles cada una (60 árboles por bloque), excluyendo del estudio los árboles limítrofes para eliminar el efecto borde. El estado hídrico del cultivo se evaluó mediante medidas periódicas del potencial hídrico del tallo al mediodía solar (Ψ_{tallo}). La medición se realizó en dos hojas maduras del dosel exterior, empleando 8 árboles por tratamiento (2 árboles por bloque). En el momento de la recolección, se determinó la producción de tres árboles por bloque y tratamiento (12 árboles por tratamiento). Se midió el número de frutos y el peso total de los frutos de cada árbol.

3. Resultados y discusión

La programación del riego en el tratamiento control se realizó semanalmente de manera convencional por un técnico especializado, partiendo de los datos teóricos de la ET_c, obtenidos a través de la plataforma <http://riegos.ivia.es/> (estación agroclimática de Pedralba, Valencia) y los datos registrados por los sensores de humedad, con el fin de mantener un nivel de humedad en el suelo óptimo, minimizando los drenajes. Siguiendo estos criterios de programación, en la campaña 2022-2023 se aplicó un volumen de riego de 443 mm (Tabla 1), manteniendo un contenido relativo de humedad (CRH) en el suelo en valores óptimos, entre 0,8 y 1 (Fig. 1A). En estas condiciones, los valores medios de Ψ_{tallo} oscilaron entre -0,8 y -1,2 MPa a lo largo del ciclo de cultivo (Figura 2B), mostrando un estado hídrico del cultivo adecuado [8].

Tabla 1. Volumen de agua aplicada en el riego y valores medios de los factores de corrección aplicados en la programación del riego de los diferentes modelos durante la campaña 2022-2023.

Tratamientos	Riego (mm)	Factores de corrección		
		k_i	k_θ	k_{ET_0}
Control	443	-	-	-
ModeloH	466	1,12	1,12	1,00
ModeloP	305	1,01	1,12	0,91

La aplicación del ModeloH, que considera la información de los sensores de humedad del suelo en la zona radicular y los valores históricos de la ET₀ calculada por HS, ha supuesto la aplicación de un volumen de riego ligeramente superior al tratamiento control (+7,6%). La programación del riego aplicando el ModeloH permitió mantener niveles de CRH superiores a 0,8 en gran parte del ciclo de cultivo, exceptuando el periodo entre mediados de agosto y

finales de septiembre (semanas 33-40), en el que descendió a valores próximos a 0,7 (Fig. 1A). En este periodo, la aplicación del ModeloH infraestimó la dosis de riego, aplicando volúmenes de riego más bajos que el tratamiento Control (Fig. 2). Aparentemente, la infraestimación registrada en la dosis de riego aplicada ha sido debida principalmente al factor de corrección k_{θ} . El factor k_{ET_0} no sufrió cambios destacables debido a que los valores de ET_0 históricos y los observados fueron similares en este periodo (Fig. 1B). Sí cabe destacar que el ModeloH fue capaz de detectar valores bajos de CRH en este periodo, que supuso la aplicación de k_i superiores a 1 (Fig. 1C), aunque no fueron suficientes para mantener la demanda hídrica del cultivo. En estas condiciones de humedad en el suelo, se observó un ligero empeoramiento del estado hídrico, con valores de Ψ_{tallo} en torno a -1,3 MPa, frente a los -0,8 MPa de los árboles Control (Fig. 2B). En cambio, a partir de la semana 40, la estimación de la dosis de riego fue ligeramente superior al tratamiento Control, manteniendo esta tendencia hasta la semana 56, lo que supuso mantener valores de CRH en torno a 1. A nivel agronómico, la programación del riego estimada con el ModeloH, tuvo un impacto ligeramente positivo sobre el rendimiento productivo y la carga de frutos respecto al tratamiento Control (Tabla 2).

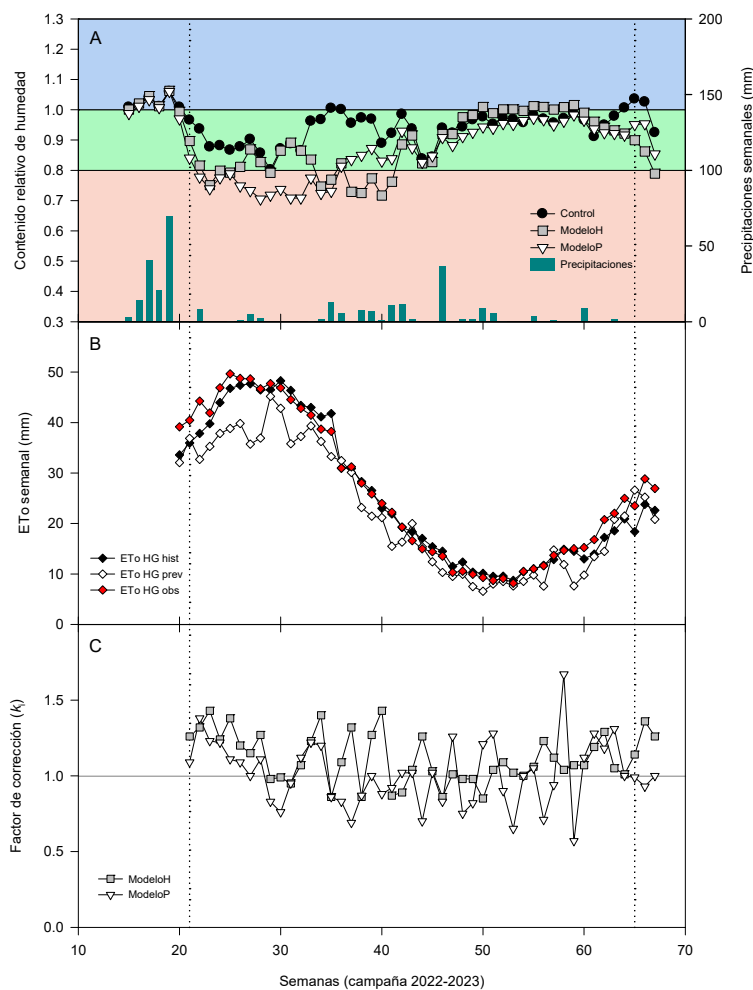


Figura 1. Evolución del contenido relativo de humedad en el suelo (A), de la evapotranspiración de referencia (ET_0) histórica, prevista y observada por el método Hargreaves-Samani (B) y de los factores de corrección obtenidos por los modelos evaluados durante la campaña 2022-2023.

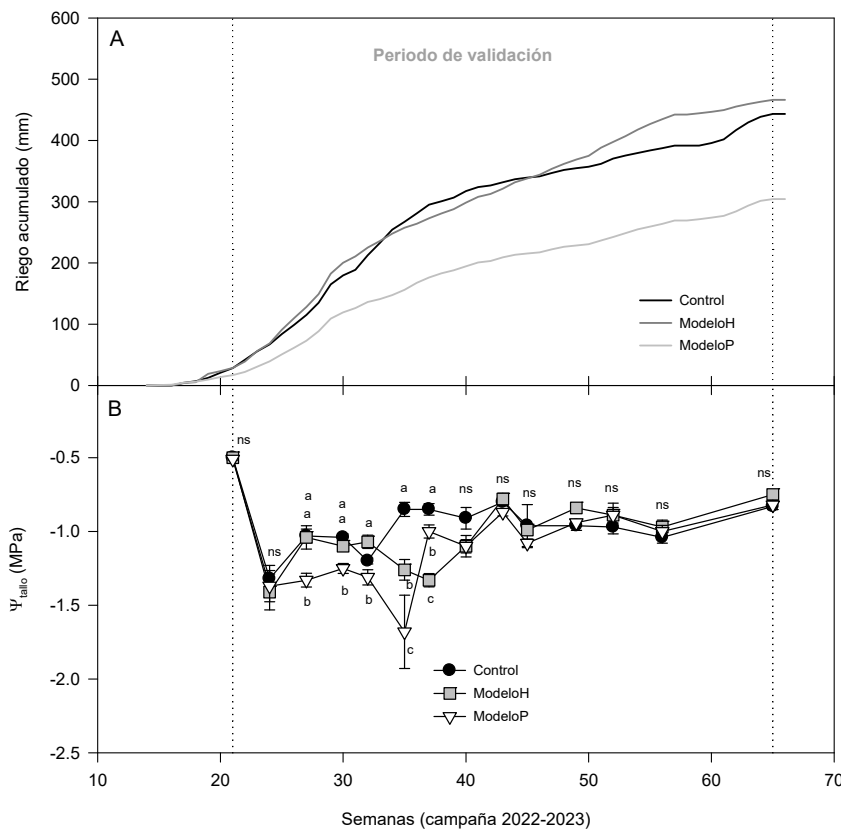


Figura 2. Evolución del riego acumulado (A) y del potencial hídrico del tallo medido a mediodía (Ψ_{tallo}) (B) en los diferentes tratamientos de riego durante la campaña 2022-2023.

Tabla 2. Parámetros productivos de los diferentes tratamientos de riego evaluados durante la campaña 2022-2023. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas al 95% según el test de Duncan.

Tratamiento	Rendimiento (kg árbol ⁻¹)	Carga de frutos (N.º frutos árbol ⁻¹)	Peso medio de fruto (g fruto ⁻¹)
Control	24,8 ab	112,2 ab	222 a
ModeloH	29,4 a	117,9 a	249 a
ModeloP	19,0 b	99,0 b	192 b

Por otro lado, la aplicación del ModeloP, que considera la información de los sensores de humedad del suelo en la zona radicular y la previsión a 7 días de la ET_0 calculada por HS, ha supuesto la aplicación de un volumen de riego significativamente menor al tratamiento control (-31,2%) (Tabla 1). La infraestimación de la dosis de riego transcurrió principalmente desde el inicio de la aplicación del modelo y hasta finales de agosto (semanas 21-32) (Fig. 2A). En este periodo, el CRH descendió por debajo de 0,8, valor umbral establecido para árboles bien regados, indicando que la dosis de riego estimada por el modelo no fue suficiente para reponer el agua extraída por el cultivo. En este caso, el principal factor que minoró la dosis de riego fue el k_{ET_0} , ya que el valor promedio k_{θ} fue similar en ambos modelos (Tabla 1). Respecto al k_{ET_0} , se observa que la aplicación del ModeloH generó valores más elevados que el ModeloP, lo que significa que el ModeloP tiende a reducir las dosis de riego, especialmente durante los meses de verano, cuando tienen lugar las condiciones más extremas. En la figura 1B se puede

observar como en este periodo la previsión de la ET_0 mostró valores más bajos que la ET_0 observada. Esto se debe a que la estimación de la ET_0 a 7 días calculada mediante HS genera una infraestimación de la dosis de riego debido a que considera las temperaturas extremas, y estos valores han resultado ser más elevados en los valores observados que en los previstos. En cambio, el resto del ciclo de cultivo, durante los meses de baja demanda hídrica, los valores de la ET_0 previstos fueron similares a los valores de ET_0 observados (Fig. 1B). Esto se reflejó en una mejora en la estimación de la dosis de riego, que permitió mantener niveles de CRH similares al Control (Fig. 1A). A nivel de cultivo, la falta de precisión en la estimación de la dosis de riego del ModeloP, durante las semanas 21-32, generó cambios en el estado hídrico del cultivo. En este periodo se observó un descenso significativo de los valores de Ψ_{tallo} , alcanzando valores de -1,7 MPa, indicadores de que el cultivo está sufriendo un nivel de estrés hídrico moderado-severo [9]. Este periodo de estrés ha tenido un impacto negativo sobre la respuesta productiva ya que se ha producido durante uno de los periodos más sensibles al déficit hídrico en cítricos [8]. Los árboles del ModeloP mostraron un descenso en la producción, debido principalmente a una reducción de la carga de frutos y del peso medio del fruto (Tabla 2). Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de modificar el método de cálculo de la ET_0 , para poder conseguir una mayor precisión al aplicar las variables climáticas previstas.

4. Conclusiones

La aplicación de algoritmos para el cálculo de las necesidades de riego, basados en el uso de sensores de humedad de bajo coste y los datos históricos de ET_0 , ha demostrado ser una herramienta prometedora para la programación automática del riego en cítricos. Por otro lado, el método de cálculo del factor asociado a la ET_0 basado en la metodología de Hargreaves - Samani, indujo a una infraestimación de las necesidades de riego en el algoritmo que contempla las previsiones meteorológicas, a diferencia de aquel que recurre a datos históricos. Esta infraestimación fue más acusada durante los meses de máxima exigencia hídrica del cultivo induciendo a mermas productivas. Por este motivo, se recomienda continuar los estudios evaluando otros métodos de estimación de la ET_0 como Penman-Monteith [3].

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación obtenida a través del proyecto PRIMA "HANDYWATER" (PCI2021-121940, MCIN/AEI/10.13039/5011000110033) por la Unión Europea. E. Cámara disfruta del contrato EDGIID/2021/225 de la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital (Generalitat Valenciana). M. Tasa disfruta de un contrato predoctoral de la Generalitat Valenciana (ACIF/2021/413).

Referencias

1. Ladaniya, M.S.; Marathe, R.A.; Murkute, A.A.; Huchche, A.D.; Das, A.K.; George, A.; Kolwadkar, J. Response of Nagpur mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) to high density planting systems. 2021. Scientific, 11(1): 10845.
2. García-Tejero, I.F.; Durán-Zuazo, V.H.; Muriel-Fernández, J.L. Towards sustainable irrigated Mediterranean agriculture: implications for water conservation in semi-arid environments. 2014. Water international, 39(5), 635-648.
3. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. 1998. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300 (9), D05109.



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



4. Martínez-Gimeno, M.A.; Jiménez-Bello, M.A.; Lidón, A.; Manzano, J.; Badal, E.; Pérez-Pérez, J.G.; Bonet, L.; Intrigliolo, D.S.; Esteban, A. Mandarin irrigation scheduling by means of frequency domain reflectometry soil moisture monitoring. 2020. *Agricultural Water Management*, Vol. 235: 106151.
5. Vanella, D.; Intrigliolo, D.S.; Consoli, S.; Longo-Minnolo, G.; Lizzio, G.; Dumitrache, R.C.; Mateescu, E.; Deelstra, J.; Ramírez-Cuesta, J.M. Comparing the use of past and forecast weather data for estimating reference evapotranspiration. 2020. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 295:108196.
6. EUROSTAT. 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ef_m_farmleg/default/table?lang=en
7. Bonet, L.; Ferrer, P.; Castel, J.R.; Intrigliolo, D.S. Soil capacitance sensors and stem dendrometers: useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards? 2010. *Spanish J. Agric. Res.*, Vol. 2: 52-65.
8. Pérez-Pérez, J.G.; Romero, P.; Navarro, J.M.; Botía, P. Response of sweet orange cv. 'Lane late' to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. *Irrigation Science*, 2008, Vol. 26(5): 415-425.
9. Pérez-Pérez, J.G.; Robles, J.M.; Botía, P. Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby' grapefruit trees in semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, Vol. 133:44-54.