

Seguimiento de las necesidades hídricas del cultivo del almendro combinando la fusión de imágenes de satélite y el balance de energía en superficie

David Gómez-Candón ⁽¹⁾, Álvaro Sánchez-Virosta ⁽¹⁾, Yeray Pérez ⁽¹⁾, Juan M. Sánchez ^{*(1)}, José González-Piqueras ⁽¹⁾, Joan M. Galve ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo de Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional (IDR), Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete, Spain, david.gomezcandon@uclm.es; alvaro.sanchez@uclm.es; yeray.perez@uclm.es; *juanmanuel.sanchez@uclm.es; jose.gonzalez@uclm.es; joanmiquel.galve@uclm.es

Resumen: La estimación de las necesidades hídricas de los cultivos leñosos a partir de la combinación de imágenes de satélite y modelos de balance de energía representa un desafío a escala de parcela debido a las limitaciones espacio-temporales de los sensores actuales que operan en el infrarrojo térmico. Este estudio presenta una metodología que trata de solventar estos problemas de resolución temporal al calcular la evapotranspiración real de cultivo diaria, al menos, una vez por semana, e interpolar posteriormente hasta completar la serie, empleando los valores diarios de evapotranspiración de referencia y los coeficientes de cultivo estimados. Por otro lado, se hace frente a la problemática de la baja resolución espacial gracias a los avances recientes en la fusión de datos de los satélites Sentinel-3, Sentinel-2 y Landsat, que permiten reducir el tamaño de píxel del dato de temperatura de superficie hasta los 10-20 m. La investigación se llevó a cabo en una parcela de almendros dotada de riego por goteo, ubicada en la provincia de Albacete. Este trabajo se centra en el periodo de estudio intensivo del verano de 2023. Los resultados del modelo se evaluaron utilizando registros de una torre de flujos instalada en la zona, mostrándose un error de estimación medio inferior a 1.5 mm día⁻¹. Si bien la incertidumbre a escala diaria puede resultar elevada, los acumulados semanales y estacionales ven reducido su error. Esto resulta de gran interés para tareas de programación de riego a escala de parcela, o de gestión de los propios recursos hídricos a escala de acuífero, ante el desafío que supone la rápida expansión de este tipo de cultivos que se está produciendo en zonas áridas y semiáridas de nuestro territorio.

Palabras clave: TSEB, evapotranspiración, temperatura de superficie, flujos energéticos, Sentinel.

Monitoring of water needs in almond orchards through satellite data fusion and surface energy balance

Abstract: *The estimation of water needs for woody crops through the combination of satellite imagery and energy balance models poses a challenge at a plot scale due to the spatio-temporal limitations of the current sensors operating in the thermal infrared. This study introduces a methodology that aims to address these temporal resolution issues by calculating the actual daily crop evapotranspiration, at least once a week, and subsequently interpolating to complete the series, using daily reference evapotranspiration values and estimated crop coefficients. On the other hand, the challenge of low spatial resolution is tackled through recent advances in data fusion from Sentinel-3, Sentinel-2, and Landsat satellites, which allow reducing the pixel size of surface temperature data to 10-20 m. The research was conducted in an almond orchard plot equipped with drip irrigation, located in the province of Albacete. This work focuses on the intensive summer study period of 2023. The model results were evaluated using records from a flux tower installed in the area, showing an average estimation error below 1.5 mm day⁻¹. While daily-scale uncertainty may be high, the weekly and seasonal accumulations reduce their error. This is of great interest for irrigation scheduling at the plot scale or for the management of water resources at the aquifer scale, considering the challenge posed by the rapid expansion of these crops occurring in arid and semi-arid areas of our territory.*

Keywords: *TSEB, evapotranspiration, land surface temperature, surface energy fluxes, Sentinel.*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha incrementado de forma significativa el interés por el cultivo del almendro dentro del sector agrícola. Esta tendencia viene impulsada por la creciente demanda mundial de almendra debido a su valor nutricional y sus diversas aplicaciones en industria. Sin embargo, al igual que ocurre en otros casos, el cultivo del almendro enfrenta el desafío crítico de una gestión eficiente del agua, especialmente en regiones semiáridas. Con los recursos hídricos bajo presión, el seguimiento del consumo de agua de los cultivos, especialmente en cultivos leñosos en regadío, se ha vuelto crucial para una

gestión sostenible del agua. Abordar este desafío requiere metodologías para una evaluación precisa y oportuna. La integración de modelos de balance de energía en superficie, especialmente el modelo de balance de energía de dos fuentes (TSEB) utilizando imágenes de satélite, se presenta como una opción bastante atractiva (Sánchez et al., 2021). La formulación TSEB permite la estimación del consumo de agua de los cultivos partiendo de los flujos de energía entre la superficie terrestre y la atmósfera, capturando así las condiciones reales del estado hídrico del cultivo. Además, el parámetro clave en estos modelos, la temperatura de la superficie terrestre, se puede obtener a alta resolución mediante la técnica de desagregación de imágenes de satélite (Sánchez et al.,

2024). A pesar de su potencial, la aplicación de estos modelos demanda en ocasiones recursos computacionales y tiempos de cálculo dilatados, suponiendo esto una limitación para el acceso y uso operativo. Reducir la carga computacional y el tiempo de procesamiento requerido para el análisis de datos de satélite es imperativo para permitir su uso óptimo y práctico por parte de los agricultores y de los gestores que persiguen una gestión efectiva del agua y prácticas sostenibles del cultivo del almendro.

Este trabajo aborda el desafío de la estimación diaria de la evapotranspiración real (ET) a escala de parcela de forma operativa sobre grandes áreas agrícolas. Para ello se aplican los avances más recientes que combinan la fusión de datos de satélite de Sentinel-2 (S2), Sentinel-3 (S3) y Landsat junto con el modelo TSEB. Más allá del dato diario, la estimación semanal de ET resulta crucial para la gestión eficiente del riego, especialmente en regiones semiáridas. En este estudio se plantea el uso del coeficiente de cultivo (K_c), combinado con la evapotranspiración de referencia (ET_0), como parámetros base para esa interpolación diaria de ET.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y medidas

Este estudio se llevó a cabo en una parcela comercial de almendros (*Prunus dulcis*) de 10,6 ha con riego por goteo (39°15'58"N, 1°56'23"W), ubicada en la provincia de Albacete (Figura 1). Los árboles se plantaron en 2017. Se realizó un seguimiento de la plantación durante la temporada de crecimiento de 2023, y este trabajo muestra los resultados dentro período que comprende desde el 5 de junio al 25 de julio. Los datos meteorológicos necesarios se recopilaron de la estación agroclimática de la red SIAR más cercana, La Gineta.

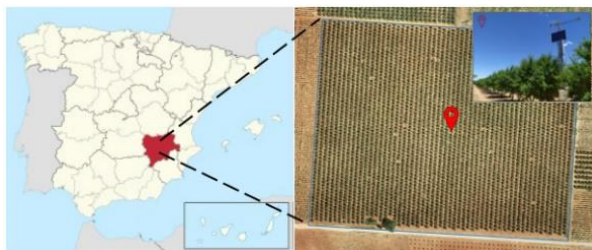


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en el término de Tarazona de la Mancha, Albacete. Se muestra una fotografía de la torre de flujos energéticos instalada en la parcela de almendro, incluida en el European Fluxes Database Cluster (ES-TzM).

En la zona central de la parcela, y ubicada aproximadamente a 150 m del borde del campo (Figura 1) se instaló una torre de flujos dotada de un sistema de covarianza de torbellinos, además de sensores de radiación neta, flujo de calor en el suelo, y sondas de humedad y temperatura, tanto del aire, como del propio suelo, que registran datos a intervalos de 15 min.

2.2. Estimaciones de ET

Las estimaciones de ET se realizaron aplicando el modelo de balance de energía de dos fuentes (TSEB) (Norman et al., 1995; Kustas & Anderson, 2009) para cada fecha seleccionada con imágenes de satélite disponibles libres de nubes. Para reducir carga computacional y tiempo de cálculo, estas estimaciones (ET-Sat) se realizaron una vez por semana. Se emplearon imágenes S2 con una resolución espacial de 20 m para desagregar los datos térmicos de S3 de su resolución original de 1 km a 20 m, siguiendo la metodología descrita en Guzinski et al. (2023). Los parámetros biofísicos del cultivo derivados de los datos multiespectrales de S2 y los datos de temperatura de superficie resultado de la desagregación de S3, se utilizaron como entradas para el modelo TSEB.

Para los días con estimación de ET-Sat, se elaboró también un mapa de coeficientes de cultivo obtenidos a partir de la relación $K_c = ET\text{-Sat}/ET_0$. En este trabajo, se utilizaron datos de ET_0 también de la estación agroclimática de La Gineta. La técnica de interpolación de los valores de ET ($ET\text{-mod} = K_c \cdot ET_0$) (Allen et al., 1998) consiste en asumir que las condiciones del cultivo (K_c) no varían de forma significativa durante una semana, y que los valores de ET_0 tienen en cuenta la variabilidad en las condiciones meteorológicas que condicionan la demanda evaporativa de cada día.

Los datos locales de flujos energéticos registrados en la torre permiten una comparativa de los resultados instantáneos obtenidos de los propios flujos turbulentos, calor sensible (H) y calor latente (LE), y de la radiación neta (R_n), así como de los valores de ET diaria.

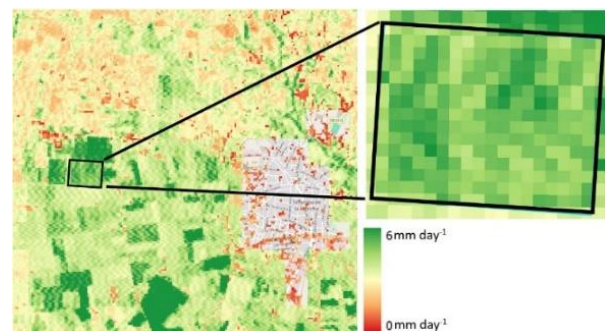


Figura 2. Ejemplo de un mapa de evapotranspiración real diaria (ET), correspondiente al 10/07/2023, obtenido para la zona de estudio ES-TzM, con una resolución espacial de 20 m de tamaño de píxel.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de la distribución espacial de las estimaciones de ET-Sat para la zona de estudio, correspondiente al 10 de julio de 2023. En esta Figura 2 se puede apreciar el potencial de la metodología basada en aprovechar la alta resolución espacial de S2 para capturar la variabilidad intraparcelaria.

Los valores obtenidos de ET diaria oscilan entre 1-6 mm día⁻¹ para el promedio de la parcela (Figura 3),

alineándose con los valores esperados para una plantación de almendros durante esta fase de desarrollo.

La Figura 4 muestra la comparación entre los resultados de los flujos energéticos instantáneos (R_n , H , y LE), a la hora de paso del satélite, y las medidas in situ registradas en las torres de instrumentación. El resumen de los principales estadísticos de la validación (desviación sistemática, Bias, y error cuadrático medio, RMSE) se incluye dentro de la propia figura. Por su parte, la validación de los resultados de ET se muestra en la Figura 5. Se aprecia una subestimación bastante sistemática de los valores de R_n , mientras que la dispersión en los valores de los flujos turbulentos es algo mayor. Hay una clara sobreestimación de los valores de H que lleva asociada al mismo tiempo una subestimación en los resultados de LE . La comparación de los resultados de ET con los valores registrados en la torre presenta una correlación de $r^2=0.506$ (Figura 5). Se observa una subestimación sistemática de 1.0 mm-día^{-1} y un error cuadrático medio de 1.5 mm-día^{-1} . Aunque esta precisión en términos cuantitativos es ligeramente inferior a lo obtenido en estudios anteriores (Guzinski et al., 2023), los resultados siguen siendo optimistas en cuanto a la viabilidad de la aplicación de la técnica para realizar el seguimiento del estado hídrico, y las necesidades de riego, de las plantaciones de almendro.

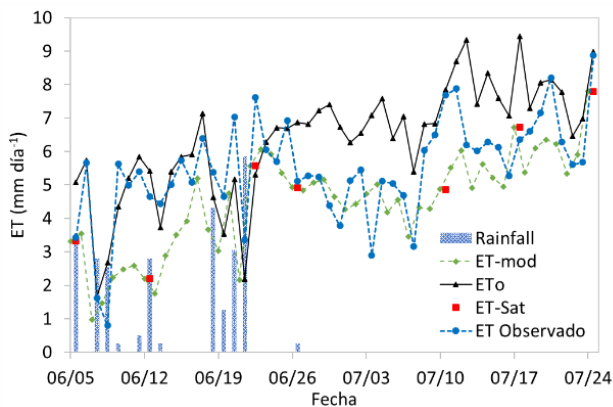


Figura 3. Evolución de los valores estimados y medidos de ET para el periodo de estudio. También se superponen los valores de E_{To} y la precipitación.

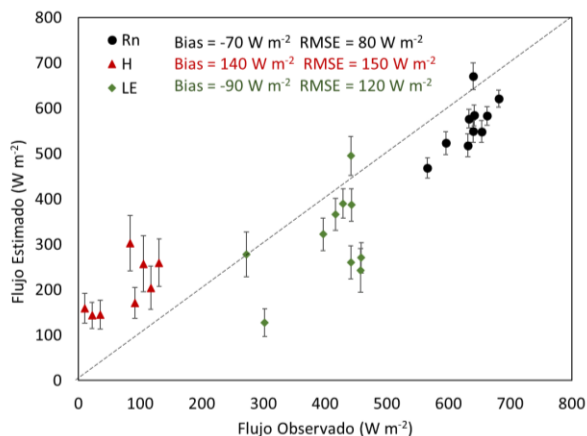


Figura 4. Comparación entre los valores de los flujos energéticos en superficie estimados por el modelo y las medidas registradas in situ en la torre.

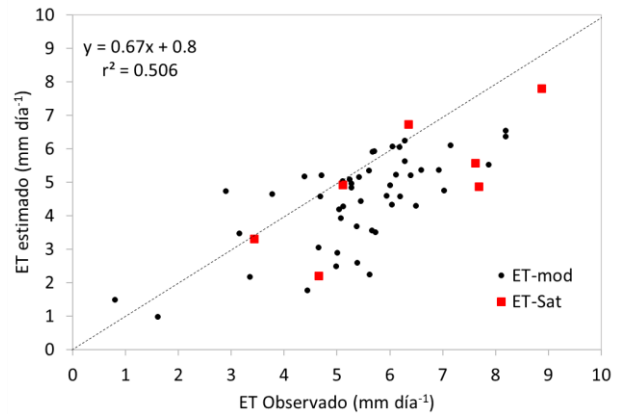


Figura 5. Regresión lineal entre los valores estimados por el modelo y observados en torre de ET diaria.

Si nos centramos en los valores acumulados semanales de ET, persiste esa subestimación sistemática, aunque no es tan marcada. Esta desviación está siendo objeto de estudio y su análisis se abordará en próximos trabajos.

4. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la viabilidad de la estimación diaria de ET aprovechando la capacidad de combinar datos de S2, S3 y Landsat fusionados con el modelo de balance de energía en superficie TSEB.

Además, la técnica de interpolación temporal empleando los coeficientes de cultivo estimados junto con información diaria de E_{To} permite esquivar las limitaciones de huecos de las series de imágenes S2-S3 disponibles. En este momento está en marcha una investigación más completa que tiene que explorar la optimización de la metodología para tener en cuenta también los efectos de la lluvia y la acumulación de valores de ET a escala estacional con fines de contabilidad del agua.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (Consejería de Educación, Cultura y Deportes) a través del proyecto PISATEL (SBPLY/21/180501/000070), y del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos WATERSNUTS (TED2021-130405B-I00) e IRENE (PID2020-113498RB-C21), ambos cofinanciados con fondos FEDER y Next Generation EU/PRTR.

6. BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., D. Raes, M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements, Irrig. Drain. Pap. No. 56, FAO, Rome, Italy.

- Guzinski, R., H. Nieto, R.R. Sánchez, J.M. Sánchez, I. Jomaa, R. Zitouna-Chebbi, O. Roupsard, R. López-Urrea. 2023. Improving field-scale crop actual evapotranspiration monitoring with Sentinel-3, Sentinel-2, and Landsat data fusion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103587.
- Kustas, W. & M. Anderson. 2009. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modelling". *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(12), 2071-2081.
- Norman, J.M., W.P. Kustas, K.S. Humes. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), 263-293.
- Sánchez, J.M., Ll. Simón, J. González-Piqueras, F. Montoya, R. López-Urrea. 2021. Monitoring Crop Evapotranspiration and Transpiration/Evaporation Partitioning in a Drip-Irrigated Young Almond Orchard Applying a Two-Source Surface Energy Balance Model, *Water*, 13(15), 2073.
- Sánchez, J.M., J. M. Galve, H. Nieto and R. Guzinski, Assessment of High-Resolution LST Derived From the Synergy of Sentinel-2 and Sentinel-3 in Agricultural Areas. 2024. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 916-928.

