

Sánchez, J.; Moya, A.; Nieto, H.; Sánchez-Virosta, A.; Galve, J.; González-Piqueras, J. Ensamblaje de modelos para el seguimiento de las necesidades hídricas de los cultivos leñosos mediante Teledetección

Ensamblaje de modelos para el seguimiento de las necesidades hídricas de los cultivos leñosos mediante Teledetección

Sánchez, Juan Manuel¹ Moya, Alejandro² Nieto, Héctor³ Sánchez-Virosta, Alvaro¹
Galve, Joan Miquel¹ González-Piqueras, José¹

¹ Grupo de Teledetección y SIG, Departamento de Física, Universidad de Castilla-La Mancha, y “Teledetección, Agronomía y Riego” Unidad Asociada al CSIC a través del CIDE, IDR, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete

² Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Campus Cantoblanco, 28049, Madrid

³ Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC), C/Serrano 115b, 28006, Madrid

ORCID: Sánchez 0000-0003-1027-9351 Moya 0000-0002-8071-9845 Nieto 0000-0003-4250-6424 Sánchez-Virosta 0000-0002-3842-3792 Galve 0000-0003-1066-7717 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731

Correspondencia: juanmanuel.sanchez@uclm.es alejandro.moya@uam.es hector.nieto@ica.csic.es
alvaro.sanchez@uclm.es joanmiquel.galve@uclm.es jose.gonzalez@uclm.es

RESUMEN

La expansión de cultivos en regadío como el almendro y el pistacho en zonas áridas y semiáridas supone un desafío en un contexto de escasez de recursos hídricos. La Teledetección va ganando relevancia en el seguimiento de las necesidades hídricas de estos cultivos, gracias a la disponibilidad de imágenes de satélite cada vez con mayor resolución espacial y temporal. Sin embargo, los modelos presentan ciertas limitaciones que trasladan incertidumbre a las estimaciones. En este trabajo presentamos el ensamblaje de modelos como técnica para acotar la incertidumbre en las necesidades hídricas, con especial interés en los leñosos. El estudio se centra en la provincia de Albacete, durante los años 2022-2024, y se combinan dos modelos de balance de energía, como son METRIC y SenET_TSEB, con un modelo de balance de agua asistido por imágenes NDVI, para obtener series temporales de evapotranspiración real diaria (ETa), con resolución espacial de 20-30 m. La comparación con las medidas in situ registradas en dos torres eddy-covariance disponibles en una parcela de almendro y otra de pistacho en la zona, muestra cómo el ensamblado de modelos consigue una mejor correlación de los resultados. A escala semanal, se obtienen valores promedio de RMSE de $\pm 4,9$ mm d⁻¹ y $\pm 2,8$ mm d⁻¹ en estimación de ETa para el almendro y el pistacho, respectivamente. Los valores acumulados a lo largo de la campaña con esta metodología son consistentes y permiten ajustar la planificación del riego, detectar condiciones de estrés, y/o cuantificar necesidades hídricas a escala de parcela. Los resultados obtenidos refuerzan el papel de la Teledetección satelital en la gestión de los recursos hídricos, en cultivos en expansión como son el almendro o el pistacho.





Palabras clave: Evapotranspiración, Landsat, Sentinel, METRIC, SenET_TSEB

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 febrero 2026


Ensamblaje de modelos para el seguimiento de las necesidades hídricas de los cultivos leñosos mediante Teledetección

Sánchez, Juan Manuel ⁽¹⁾, Moya, Alejandro ⁽²⁾, Nieto, Héctor ⁽³⁾, Sánchez-Virosta, Alvaro ⁽¹⁾, Galve, Joan Miquel ⁽¹⁾, González-Piqueras, José ⁽¹⁾


⁽¹⁾ Grupo de Teledetección y SIG, Departamento de Física, Universidad de Castilla-La Mancha, y “Teledetección, Agronomía y Riego” Unidad Asociada al CSIC a través del CIDE, IDR/n Albacete.

 0000-0003-1027-9351, juanmanuel.sanchez@uclm.es ;  0000-0002-3842-3792, alvaro.sanchez@uclm.es.
 0000-0003-1066-7717, joanmiquel.galve@uclm.es;  0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es.

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid

 0000-0002-8071-9845, alejandro.moya@uam.es.

⁽³⁾ Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC).

 0000-0003-4250-6424, hector.nieto@ica.csic.es.

Resumen: La expansión de cultivos en regadío como el almendro y el pistacho en zonas áridas y semiáridas supone un desafío en un contexto de escasez de recursos hídricos. La Teledetección va ganando relevancia en el seguimiento de las necesidades hídricas de estos cultivos, gracias a la disponibilidad de imágenes de satélite cada vez con mayor resolución espacial y temporal. Sin embargo, los modelos presentan ciertas limitaciones que trasladan incertidumbre a las estimaciones. En este trabajo presentamos el ensamblaje de modelos como técnica para acotar la incertidumbre en las necesidades hídricas, con especial interés en los leñosos. El estudio se centra en la provincia de Albacete, durante los años 2022-2024, y se combinan dos modelos de balance de energía, como son METRIC y SenET_TSEB, con un modelo de balance de agua asistido por imágenes NDVI, para obtener series temporales de evapotranspiración real diaria (ETa), con resolución espacial de 20-30 m. La comparación con las medidas in situ registradas en dos torres eddy-covariance disponibles en una parcela de almendro y otra de pistacho en la zona, muestra cómo el ensamblado de modelos consigue una mejor correlación de los resultados. A escala semanal, se obtienen valores promedio de RMSE de $\pm 4,9$ mm d⁻¹ y $\pm 2,8$ mm d⁻¹ en estimación de ETa para el almendro y el pistacho, respectivamente. Los valores acumulados a lo largo de la campaña con esta metodología son consistentes y permiten ajustar la planificación del riego, detectar condiciones de estrés, y/o cuantificar necesidades hídricas a escala de parcela. Los resultados obtenidos refuerzan el papel de la Teledetección satelital en la gestión de los recursos hídricos, en cultivos en expansión como son el almendro o el pistacho.

Palabras clave: Evapotranspiración, Landsat, Sentinel, METRIC, SenET_TSEB

Model ensemble to monitor water needs in woody crops by Remote Sensing

Abstract: *The expansion of irrigated crops such as almond and pistachio in arid and semi-arid regions poses a challenge in a context of water resource scarcity. Remote sensing plays a key role in monitoring crop water needs, thanks to the availability of satellite imagery with increasingly higher spatial and temporal resolution. However, models have shortcomings that lead to uncertainties in their estimates. In this study, we introduce the model ensemble technique as a method to constrain uncertainty in crop water requirements, with a particular focus on woody crops. This study is centered in the province of Albacete, for the period 2022–2024, and combines two surface energy balance models, METRIC and SenET_TSEB, with a water balance model assisted by NDVI imagery to obtain time series of daily actual evapotranspiration (ETa), with a spatial resolution of 20–30 meters. Comparison with in situ measurements recorded at two eddy-covariance towers located in almond and pistachio orchards shows better correlation of the results using the ensemble. At a weekly scale, an average RMSE of ± 4.9 mm d⁻¹ and ± 2.8 mm d⁻¹ are obtained for the almond and pistachio crops. Accumulated ETa values over the growing season are consistent and provide confidence to assist in irrigation scheduling, detect stress conditions, and/or quantify water needs at a plot scale. These results reinforce the role of satellite remote sensing in water resources management, in expanding crops such as almond and*

pistachio orchards.

Keywords: *Evapotranspiration, Landsat, Sentinel, METRIC, SenET_TSEB*

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos leñosos como el almendro y el pistachero están proliferando rápidamente en regiones agrícolas áridas y semiáridas. España ocupa el primer lugar en extensión plantada de almendro a nivel mundial, con más de 650.000 ha, y cuenta ya con más de 70.000 ha de cultivo de pistacho. Por otro lado, los recursos hídricos en estas zonas se ven sometidos a un alto riesgo de sobreexplotación. Resulta pues evidente la necesidad de mejorar nuestra comprensión del uso del agua en estos cultivos, lo que pasa por un seguimiento preciso de la evapotranspiración real del cultivo (ETa), pero también es crucial el poder cuantificar la incertidumbre en dicha estimación.

Durante años, se han propuesto variedad de modelos de balance de energía en superficie (SEB, por sus siglas en inglés) basados en Teledetección que han mostrado ser efectivos para estimar ETa y detectar condiciones de estrés hídrico, empleando imágenes de satélite (García-Santos et al., 2022; Guzinski et al., 2023). Sin embargo, todavía existen limitaciones para una monitorización operativa y continua de la ETa diaria con una alta resolución espacial y temporal, que permita ser utilizada para fines de gestión del agua o programación de riego, especialmente en cultivos leñosos. Un ensamblaje de modelos podría ayudar a superar estas limitaciones gracias a la combinación de las capacidades de todos ellos.

El objetivo de este trabajo es mostrar cómo gracias al ensamblaje de modelos (Knipper et al., 2024) se pueden conseguir estimaciones más precisas de ETa mediante Teledetección, en cultivos sobre los que resulta particularmente complicado la parametrización de sus condiciones biofísicas, por sus características estructurales y su cobertura parcial, como sucede en los cultivos leñosos. El análisis se centrará en los valores semanales, con el foco puesto en las aplicaciones en programación de riegos, y también en los valores acumulados para toda la temporada del cultivo, con la intención de que los resultados resulten de interés para los agricultores, pero también de utilidad para los gestores del agua.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y medidas

Este trabajo se centra en la provincia de Albacete, y más concretamente muestra los resultados sobre dos parcelas experimentales de almendro y pistacho, colindantes, ubicadas en Tarazona de la Mancha, al norte de la provincia (Fig. 1).

Las dos parcelas están dotadas con una torre de medidas de flujos energéticos Eddy-Covariance (EC, por sus siglas en inglés), instalada en el centro de cada parcela, que registran cada 30-min valores de radiación neta (radiómetro neto de 4 componentes), flujo de calor en el suelo (3-4 platos de flujo), y flujos de calor sensible (anemómetro sónico) y latente (anализador de gases),

que se transforma posteriormente en evapotranspiración instantánea. Los datos registrados se acumulan después a escala diaria y semanal. Ambas torres forman parte de la red europea de bases de datos de flujos (EFDC, por sus siglas en inglés).

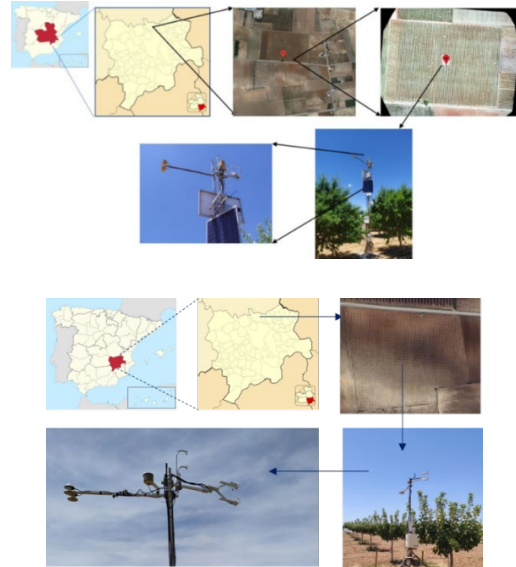


Figura 1. Ubicación de las parcelas experimentales de Almendro (ES-TzM) y Pistacho (ES-Tz2), y disposición de la instrumentación dentro de cada cultivo.

La parcela de almendro (*Prunus dulcis*) en producción tiene una extensión de 10,6 ha (39°15'58"N, 1°56'23"W) y un sistema de riego por goteo superficial. La estación EC registra datos desde 2020. La parcela de pistacho joven (*Pistacia vera*), todavía sin producción, cuenta con una extensión de 4,5 ha y un sistema de riego por goteo subterráneo en este caso. La estación EC se instaló en 2023. La información de los riegos aportados, así como los datos de precipitación, están disponibles para este trabajo. También se cuenta con una base de datos de medidas de potencial hídrico de tallo, tomadas con una cámara de presión Schölander, con una frecuencia de 10-15 días durante el periodo de estudio, en ambas plantaciones, y que sirve de elemento de control del estado hídrico de los árboles en todo momento.

2.2. Modelos integrados

Por el momento, se han implementado dos modelos de balance de energía, el modelo Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC, Allen et al., 2007) y la versión del Two-Source Energy Balance adaptada a Sentinel (SenET-TSEB, Guzinski et al., 2023). Para el modelo METRIC se han empleado los mapas de ET generados directamente a través de la aplicación EEFLUX (<https://eefflux-level1.appspot.com/>). En este caso se trabaja con la serie temporal de imágenes VNIR y TIR de Landsat 8 y 9, con un tamaño de píxel de 30 m. Recientes avances en materia de desagregación térmica, permiten mejorar

esta resolución combinando las capacidades VNIR y TIR de Sentinel-2 y -3. Esto es lo que implementa el modelo SenET-TSEB, que combina la capacidad multispectral y de alta resolución espacial de Sentinel-2 (S2) con la capacidad térmica y de alta frecuencia de revisita de Sentinel-3 (S3), para generar mapas de LST a una resolución de 20 m, para cada fecha disponible de imagen S3. Ambos modelos se han aplicado con éxito con anterioridad, sobre una variedad de cultivos y condiciones climáticas (García-Santos et al. 2022; Guzinski et al., 2023). Sin embargo, son reconocidas ciertas limitaciones del modelo METRIC, debido a la necesidad de identificar sobre la imagen una zona seca y otra húmeda, para una correcta calibración. Por su parte, el modelo TSEB necesita de la integración de información de variables estructurales de la vegetación y los cultivos, por lo que se necesita de un mapa de clasificación de cultivos.

Siguiendo la iniciativa OpenET (Knipper et al., 2024), decidimos integrar en el ensemble también las salidas de la herramienta CWRweb (Campoy et al. 2025). Esta herramienta estima las necesidades hídricas del cultivo (CWR) como una primera aproximación de la evapotranspiración real del cultivo, empleando también series temporales de imágenes de satélite VNIR de Sentinel-2, e información meteorológica. Esta herramienta proporciona ET bajo condiciones estándar empleando la metodología del coeficiente de cultivo-evapotranspiración de referencia (Kc-ET_o). Sin embargo, este modelo presenta limitaciones en cultivos de cobertura parcial, o bajo condiciones de estrés hídrico, manejo frecuente en los cultivos leñosos.

Para este trabajo contamos con información de ETo observacional diaria proporcionada por AEMET con un tamaño de rejilla de 5x5 km². Es importante señalar que los huecos diarios en ETa entre pasadas de satélite deben rellenarse mediante un procedimiento de interpolación asistida por los valores de ETo.

2.3. Validación

Para evaluar la batería de modelos, así como el resultado del ensamblaje de los mismos, se cuenta con las medidas de las torres EC. Estas medidas se han procesado siguiendo los estándares internacionales y se ha aplicado un rellenado de huecos conservador para disponer de una serie continua de datos acumulados semanales con entidad para una validación de los resultados. Para cada uno de los mapas de ETa acumulada semanal, se ha extraído un conjunto de 3x3 píxeles centrado en la ubicación de las torres, y el valor promedio se ha comparado con el dato observado.

Más allá de esta validación vicaria a escala semanal, resulta muy interesante evaluar la capacidad de los modelos para detectar situaciones de estrés hídrico que se hayan podido producir durante el periodo de estudio, además de dar resultados de ETa estacional. Por este motivo, se analizará también el acumulado de ETa a lo largo de todo el año, con particular interés durante la fase de desarrollo del cultivo. Los datos de precipitación y riego permiten valorar si el aporte de riego va cubriendo o no las necesidades hídricas marcadas por la ETa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, el resultado de los modelos METRIC y SenET_TSEB para la zona de estudio y una semana concreta del periodo analizado. Se trata de mapas de ETa semanal con un tamaño de píxel de 30 m y 20 m, respectivamente. Esta diferencia en resolución espacial se traduce en un mayor nivel de detalle en la imagen de ETa con SenET-TSEB que permite resolver parcelas de menor tamaño. Por otra parte, el ejemplo de la Figura 2 muestra discrepancias entre los dos modelos, más marcadas en las zonas con baja densidad de vegetación. Esta tendencia se mantiene a lo largo de todo el periodo de estudio.

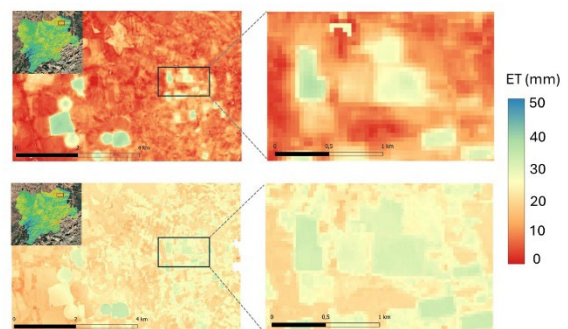


Figura 2. Mapas de ETa semanal (mm) para la semana 33 del año 2024 sobre la zona de estudio. En la parte superior se muestran los resultados de METRIC y en la parte inferior los de SenET-TSEB.

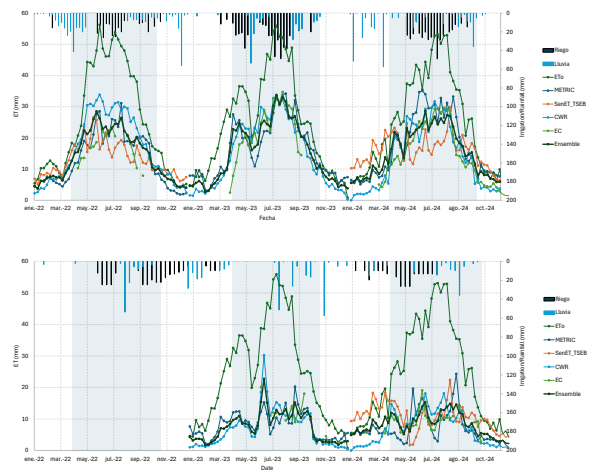


Figura 3. Evolución para el almendro (superior) y el pistacho (inferior) de los valores semanales de ETo, riego, lluvia, y ET obtenida con los distintos modelos y el ensemble.

La Figura 3 muestra la gráfica de evolución de los resultados de ETa semanal para todo el periodo de estudio. Se ofrecen los resultados de los distintos modelos por separado y del ensemble realizado. Las gráficas muestran la estabilidad espaciotemporal de la técnica de CWRweb, frente a una mayor variabilidad en las salidas de METRIC y SenET_TSEB, en parte consecuencia de su capacidad para capturar condiciones no estándar. Además, estos modelos de

balance de energía son capaces de capturar los picos de ET que se producen tras los eventos de lluvia y/o riegos. Los resultados de la validación cuantitativa se recogen en las gráficas de la Figura 4. El ensamble ofrece ligeros mejores resultados del ajuste lineal con los valores medidos por la torre. El ensamble es capaz de estimar la ETa semanal con un error cuadrático medio de $\pm 4,9$ mm y $\pm 2,8$ mm, para el almendro y el pistacho, respectivamente, con una cierta sobrestimación de 2,7 mm en el almendro, que resulta prácticamente despreciable en el caso del pistacho. Esto supone aproximadamente entre un 15-20% de error relativo en la fase meseta.

De acuerdo con el ensamble, las necesidades hídricas del almendro han oscilado entre los 572 mm del año 2022 y los 657 del año 2023. Si nos centramos en las demandas de riego en el almendro, para el año 2023 se cubrieron con el plan de riegos seguido, mientras que para el 2024, el aporte de riego se quedó casi 60 mm por debajo de la necesidad marcada por el acumulado de ET de cultivo. Este déficit tuvo su respuesta en la plantación, como demuestran las medidas de potencial hídrico de tallo registradas (no mostradas en este trabajo) durante los meses de julio y agosto de 2024. Para el caso del pistacho, el estudio se reduce a los años 2023 y 2024, con acumulados muy similares en ambos años, rondando los 300 mm de ET acumulada por el ensamble. En este caso el aporte de riego estuvo claramente por encima de las necesidades, especialmente en el año 2023. Las medidas de potencial hídrico de tallo corroboran estas buenas condiciones hídricas.

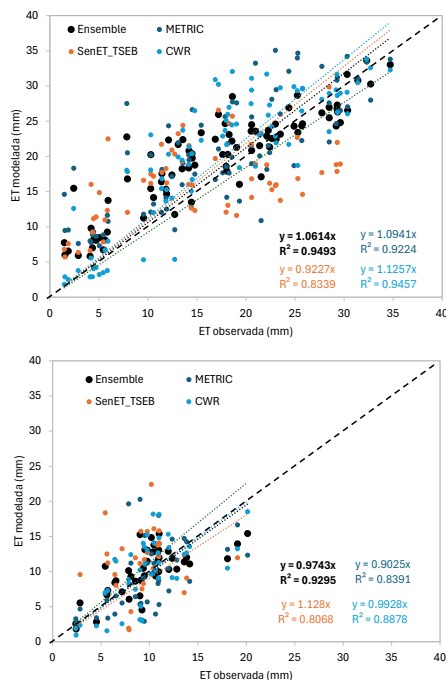


Figura 4. Regresiones lineales entre los resultados de ET semanal para los distintos modelos y el ensamble sobre la parcela de almendro (superior) y pistacho (inferior).

4. CONCLUSIONES

Este estudio viene a reforzar el potencial de la técnica del ensamblaje de modelos basados en técnicas de

Teledetección para apoyar la planificación de riegos, detectar condiciones de estrés hídrico, y/o cuantificar necesidades hídricas a escala de parcela en cultivos leñosos, como el almendro y el pistacho. Pero la metodología también tiene la posibilidad de extensión a nivel de comunidad de regantes o de cuenca hidrográfica, gracias a trabajar a partir de imágenes de satélite como base. La combinación de varios modelos permite reducir las incertidumbres asociadas a cada uno de ellos por separado, y de esta forma, se consigue otorgar una mayor fiabilidad a las estimaciones de necesidades hídricas. La metodología desarrollada permitirá ir incorporando más modelos, bien de balance de energía o de balance de agua en suelo, enriqueciendo así el ensamble, y reduciendo cada vez más las incertidumbres en el seguimiento de la ETa en estos cultivos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la UE a través del FEDER y por la JCCM a través de INNOCAM (proyecto TELPIS, SBPLY/24/180225/000115), y por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, junto con FEDER, UE (Proyecto EUNOMIA, PID2024-161881OB-C21 y PID2024-161881OB-C22).

6. REFERENCIAS

Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*. (133(4)), 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395))

Campoy, J., Sánchez, J.M., Beltrán, A., Pérez, Y., Molina, A., & Calera, A. (2025). Remote-Sensing based Global Evapotranspiration estimates at high spatial resolution through Sentinel-2 satellite imagery and meteorological data. The CWRweb tool. EGU2025, Mayo 2025, Viena. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU25/EGU25-12878.html>.

García-Santos, V., Sánchez, J.M., & Cuxart, J. (2022). Evapotranspiration Acquired with Remote Sensing Thermal-Based Algorithms, A State-of-the-Art Review. *Remote Sens.* (14), 3440. <https://doi.org/10.3390/rs14143440>

Guzinski, R., Nieto, H., Ramo Sánchez, R., Sánchez, J.M., Jomaa, I., Zitouna-Chebbi, R., Roupsard, O., & López-Urrea, R. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103587>

Knipper, K., et al. (2024). A comparative analysis of OpenET for evaluating evapotranspiration in California almond orchards. *Agricultural and Forest Meteorology*, (355), 110146. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110146>