

Garrido-Rubio, J.; Molina-Medina, A.; Moya, A.; Pérez-Blanco, C.; Sánchez, J.; González-Piqueras, J.; Galve, J.
Integración de modelos asistidos por satélite para contabilizar el agua consumida por los cultivos

Integración de modelos asistidos por satélite para contabilizar el agua consumida por los cultivos

Garrido-Rubio, Jesús¹ **Molina-Medina, Antonio**² **Moya, Alejandro**³ **Pérez-Blanco, C. Dionisio**¹ **Sánchez, Juan Manuel**² **González-Piqueras, José**² **Galve, Joan Miquel**²

¹ WAVE - Water Environment and Economics. Instituto IMDEA Agua

² Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha

³ Departamento de Ingeniería Informática. Escuela Politécnica Superior.

ORCID: Garrido-Rubio 0000-0002-1739-2616 Molina-Medina 0000-0002-3706-2489 Moya 0000-0002-8071-9845 Pérez-Blanco 0000-0002-7777-4317 Sánchez 0000-0003-1027-9351 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731 Galve 0000-0003-1066-7717

Correspondencia: jesus.garrido@imdea.org antoniojesus.molina@uclm.es alejandro.moya@uam.es
dionisio.perez@imdea.org juanmanuel.sanchez@uclm.es jose.gonzalez@uclm.es joanmiquel.galve@uclm.es

RESUMEN

La contabilidad del agua de riego ha sido tradicionalmente abordada por los registros de medidores volumétricos, aunque su fiabilidad requiere de correctas instalaciones y mantenimientos, y garantizar una cobertura espacializada obliga, además, a un importante esfuerzo económico. Por el contrario, los modelos basados en teledetección permiten monitorizar extensas superficies regables y estimar la contabilidad del agua empleada por los cultivos. Este trabajo persigue reducir las incertidumbres de esta contabilidad, mediante la integración de dos modelos conceptualmente distintos, basados en balance de agua y de energía. Los resultados se muestran integrados a la escala de comunidad de regantes, con el fin de aportar mayor fiabilidad en las medidas disponibles, y mostrar aplicabilidad hacia los gestores hídricos. Este trabajo viene a contribuir a los esfuerzos por trasladar a nuestro territorio nacional, los avances que se están mostrando a nivel internacional por integrar varios modelos asistidos por satélite en la contabilidad del agua consumida (evapotranspirada) por los cultivos. Los resultados similares obtenidos entre modelos y el buen acuerdo frente a contadores ($R^2 \approx 0,81$), animan a adoptar la integración de modelos en la planificación de políticas asistidas con datos de Teledetección.

Palabras clave: *evapotranspiración, balance de agua y energía, regadío, ensemble*

Fecha de recepción: 15 febrero 2026 · **Fecha de aceptación:** 15 febrero 2026

Integración de modelos asistidos por satélite para contabilizar el agua consumida por los cultivos

Garrido-Rubio, Jesús ⁽¹⁾, Molina-Medina, Antonio ⁽²⁾, Moya, Alejandro ⁽³⁾, Pérez-Blanco, C. Dionisio ⁽¹⁾, Sánchez, Juan Manuel ⁽²⁾, González-Piqueras, José ⁽²⁾, Galve, Joan Miquel ⁽²⁾

⁽¹⁾ WAVE - Water Environment and Economics. Instituto IMDEA Agua.


 0000-0002-1739-2616, jesus.garrido@imdea.org ;  0000-0002-7777-4317, dionisio.perez@imdea.org.

⁽²⁾ Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha.

 0000-0002-3706-2489, antoniojesus.molina@uclm.es ;  0000-0003-1027-9351, juanmanuel.sanchez@uclm.es.

 0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es ;  0000-0003-1066-7717, joanmiquel.galve@uclm.es.

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Informática. Escuela Politécnica Superior.UAM. Madrid.

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

Resumen: La contabilidad del agua de riego ha sido tradicionalmente abordada por los registros de medidores volumétricos, aunque su fiabilidad requiere de correctas instalaciones y mantenimientos, y garantizar una cobertura espacializada obliga, además, a un importante esfuerzo económico. Por el contrario, los modelos basados en teledetección permiten monitorizar extensas superficies regables y estimar la contabilidad del agua empleada por los cultivos. Este trabajo persigue reducir las incertidumbres de esta contabilidad, mediante la integración de dos modelos conceptualmente distintos, basados en balance de agua y de energía. Los resultados se muestran integrados a la escala de comunidad de regantes, con el fin de aportar mayor fiabilidad en las medidas disponibles, y mostrar aplicabilidad hacia los gestores hídricos. Este trabajo viene a contribuir a los esfuerzos por trasladar a nuestro territorio nacional, los avances que se están mostrando a nivel internacional por integrar varios modelos asistidos por satélite en la contabilidad del agua consumida (evapotranspirada) por los cultivos. Los resultados similares obtenidos entre modelos y el buen acuerdo frente a contadores ($R^2 \approx 0,81$), animan a adoptar la integración de modelos en la planificación de políticas asistidas con datos de Teledetección.

Palabras clave: evapotranspiración, balance de agua y energía, regadío, ensemble

Remote Sensing-based models' ensemble for crop water use accounting

Abstract: *Irrigation water accounting has traditionally been based on records from volumetric meters, although their reliability depends on proper installation and maintenance, and ensuring spatially comprehensive coverage also entails substantial economic effort. In contrast, remote-sensing-based models enable the monitoring of extensive irrigated areas and the estimation of the water accounted for as being used by crops. This work aims to reduce the uncertainties in such accounting by integrating two conceptually different models, based respectively on water balance and energy balance approaches. The results are presented in an integrated manner at the irrigation district (water users association) scale, to provide greater confidence in the available measurements and to demonstrate applicability for water managers. This study contributes to ongoing efforts to transfer to our national context the advances being demonstrated internationally in integrating multiple satellite-assisted models for accounting of water consumed (i.e., evapotranspired) by crops. The similar results obtained between models, together with the good agreement observed against meter readings ($R^2 \approx 0,81$), support adopting this model integration in policy planning assisted by Earth Observation data.*

Keywords: *evapotranspiration, thermal and water balance, irrigation, ensemble*

1. INTRODUCCIÓN

La medición de los recursos hídricos empleados por la agricultura de regadío se ha abordado tradicionalmente mediante la instalación de instrumentos de medida como

los contadores de agua riego. Si bien, para evitar su deterioro y obtener lecturas fiables, la correcta instalación y mantenimiento exige recursos económicos y humanos. Por ello, y según el último informe ESYRCE de 2024 (www.mapa.gob.es) que cifra la superficie de

regadío en España cerca de los 3,8Mha, la instalación de instrumentos de medida repartidos por todo el territorio se aprecia cómo una estrategia de contabilidad difícilmente operativa. Por el contrario, la captura de información sobre grandes superficies por los satélites de Observación de la Tierra, representada por los programas Landsat o Copernicus, ofrece datos gratuitos, libres, fiables y en las frecuencias temporales y resoluciones espaciales adecuadas para la generación de series temporales de información que permiten monitorizar correctamente la evolución de los cultivos en las superficies de regadío. Esto ha facilitado el desarrollo de modelos para estimar la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), es decir, para contabilizar sus recursos hídricos consumidos. No obstante, estos modelos presentan limitaciones en su aplicación, así como incertidumbres en los resultados generados, que deben tenerse en cuenta a la hora de abordar la contabilidad del agua de los cultivos en regadío (Foster *et al.*, 2020).

Es por ello, que la creciente y razonable exigencia de aportar información fiable y relevante a los gestores hídricos ha adquirido una tendencia colaborativa que busca integración entre los diferentes modelos mediante su acoplamiento, con el fin de reducir las incertidumbres individuales asociadas a cada uno, aportando así mayor transparencia. Iniciativas existentes como la plataforma estadounidense OpenET (<https://etdata.org/>) ya recogen dichos planteamientos. Sin embargo, una limitación general e importante a la hora de calibrar y evaluar estimaciones de la ET_c asistida por teledetección es la disponibilidad de instrumentos de medida adecuados, como puedan ser los lisímetros o las torres de covarianza de torbellinos, que a la vez estén repartidos por todo el territorio sobre diferentes tipos de cultivos. Una alternativa actualmente más accesible son los contadores de agua de riego repartidos en mayor medida sobre las superficies en regadío y comúnmente usados por gestores hídricos. Por ello, ¿es posible emplearlos como alternativa para armonizar la ET_c asistida por satélite y generada por distintos modelos para depurar las salidas y aportar mayor confianza a la contabilidad del agua de riego? La presente comunicación aborda esta hipótesis combinando dos modelos basados en teledetección para estimar la ET_c y su evaluación a partir de los registros anuales de los contadores de riego repartidos sobre una Unidad de Demanda Agraria (UDA).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La UDA “Bombeo recarga artificial El Carracillo” (<https://mirame.chduero.es>), en adelante El Carracillo (Figura 1), situada en la Demarcación Hidrográfica del Duero, nutre con unos 14hm³/año procedentes de la masa de agua subterránea *Los Arenales-Tierra de Pinares*, unas 2.950ha de cultivos hortícolas (patata...), herbáceos (maíz...) e industriales (remolacha azucarera...). El sistema de riego mayoritario es aspersión, y debido al cultivo de hortícolas es necesario introducir barbechos en las rotaciones anuales. Con un clima mediterráneo, su precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_0) anual rondan de media los 400 y

1100 mm respectivamente, según la estación SIAR cercana de Gomezerracín (www.siar.es).

Cómo datos de partida el estudio contó con los registros anuales por campaña de riego de unos 740 contadores proporcionados por El Carracillo, además de una clasificación supervisada multitemporal basada en series temporales de NDVI por campaña, cuyas clases de clasificación de grupos de cultivos en regadío, y proporción de superficie son: cereal invierno (17%), cereal primavera (10%), primavera tardía (3%), veranos alta cobertura (48%), veranos baja cobertura (14%), hortícolas otoño (6%), alfalfa (1%) y dobles cosechas (2%). Esta clasificación, evaluada mediante la matriz de contingencia frente a las líneas de declaración SIGPAC, obtuvo una precisión global de identificación del 97%.

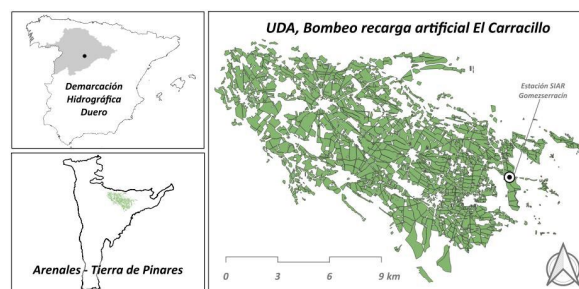


Figura 1. Localización UDA El Carracillo.

2.2. Integración de modelos basados en teledetección para la contabilidad de la ET_c .

La ET_c mensual se estimó con los modelos de balance de energía de una fuente, METRIC (*Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration*, Allen *et al.*, 2007) y balance de agua en el suelo asistido por teledetección, RS-SWB (*Remote Sensing-based Soil Water Balance*, Garrido-Rubio *et al.*, 2020). El RS-SWB generó la evapotranspiración de cultivo ajustada ET_{caj} , en adelante ET (RS-SWB), empleando el gránulo 30TUL de los satélites Sentinel 2 (A y B), con un tamaño de píxel de 10 m, y procesando una serie temporal de 63 imágenes NDVI (25 para 2021, 20 para 2022 y 18 para 2023), corregidas atmosféricamente por normalización absoluta. METRIC usó los mapas de evapotranspiración, en adelante ET (METRIC) generados por la aplicación EEFLUX (eeflux-level1), que trabaja con la serie temporal de imágenes VNIR y TIR de Landsat 8 y 9, con un tamaño de píxel de 30 m. Destacar las diferentes fuentes meteorológicas usadas por ambos modelos, mientras que el RS-SWB usó los datos diarios de P y ET_0 registrados por la citada estación SIAR, METRIC usó la ET_0 observacional diaria proporcionada por AEMET (rejilla de 5x5 km²).

Para evaluar las series mensuales de ET_c a partir de los valores brutos de agua de riego entregados se siguieron los siguientes pasos: i) cálculo del valor promedio de ET (RS-SWB y METRIC) por uso de suelo clasificado y ciclo de cultivo (derivado de las series temporales promedio NDVI); ii) consideración de la P efectiva por ciclo de cultivo y su descuento al anterior valor estimado; iii) agregación espacial a los siete términos municipales localizados en El Carracillo para recoger la frecuente

rotación de las superficies en regadío (Molina-Medina, A. *et al.*, 2024); iv) agregación espacial del agua de riego bruta por campaña recogida por los contadores en cada uno de los términos municipales y aplicación de una eficiencia global de riego del 75% (mirame.chduero.es), en adelante necesidades netas de agua de riego (NIR); y iv) evaluación de los anteriores valores totales por término municipal y campaña de riego. Finalmente, se combinaron linealmente ambas salidas de ET (RS-SWB y METRIC) generando una ET integrada (en adelante “ensemble”).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el buen acuerdo, en líneas generales, entre las series mensuales de los valores promedio de ET (RS-SWB) y ET (METRIC) por uso del suelo clasificado. Destacamos la proximidad de la evolución de la ET de ambos modelos durante las fases de desarrollo y meseta (ver NDVI promedio, Figura 2), así como los semejantes valores mensuales mínimos ($\approx 25\text{mm}$) y máximos ($\approx 150\text{mm}$). Por el contrario, apreciamos diferencias significativas entre ambas estimaciones mensuales de ET en el uso del suelo doble cosecha, particularmente en el periodo anual entre cultivos (ver NDVI promedio), o bien cuando los cultivos presentan un desarrollo más acelerado con sucesivas cosechas a lo largo de la campaña (alfalfa). También destacamos las diferencias en la fase de senescencia para la mayoría de los usos clasificados (salvo en veranos) que, sin embargo, deben tener un menor peso en la contabilidad del agua por ser coincidentes con los cortes de riego y cosecha en la mayoría de los cultivos. Resaltar, además, que las barras de dispersión asociadas a cada estimación mensual son más elevadas en la fase con mayor demanda de agua de riego, mostrando una fuerte variabilidad en este importante periodo. Este aspecto debe ser investigado en mayor profundidad para determinar las causas, cómo por ejemplo y ya observado, que diferentes fechas de siembra provoquen desfases evolutivos dentro de un mismo tipo de cultivo, y en consecuencia diferentes contabilidades.

Más allá del comportamiento mensual de la ET de ambos modelos, la Tabla 1 recoge los valores acumulados por grupo de cultivo clasificado y campaña (acotada a su desarrollo evolutivo). Nuevamente, observamos un buen acuerdo entre modelos estimando valores ligeramente superiores en ET (RS-SWB) respecto a ET (METRIC), con un promedio de las diferencias entre ambos modelos de 70mm, fundamentalmente lastrado por las significativas diferencias estimadas en alfalfa ($\approx 250\text{mm}$).

Tabla 1. Valores promedio en mm de ET (RS-SWB y METRIC) por grupo de cultivo clasificado y campaña.

Grupo de cultivos clasificado	ET (RS-SWB), mm			ET (METRIC), mm		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
Cereal invierno	510	500	540	530	440	540
Cereal primavera	460	450	390	480	380	380
Primavera tardía	350	320	280	280	240	240
Verano alta	600	610	630	550	530	530
Verano baja	490	490	490	450	450	450

Grupo de cultivos clasificado	ET (RS-SWB), mm			ET (METRIC), mm		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
Hortícola otoño	360	470	410	350	410	380
Alfalfa	880	960	1030	670	590	820
Dobles Cosechas	730	780	800	740	710	770

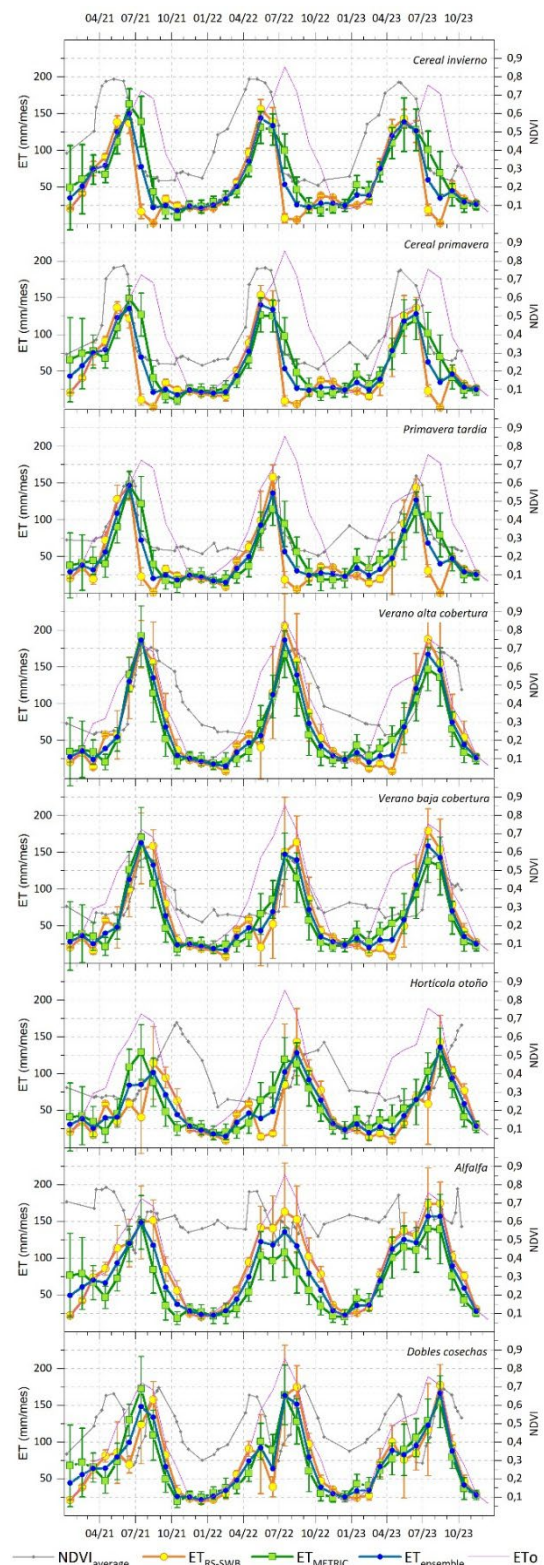


Figura 2. Serie mensual del valor promedio de ET (RS-SWB, METRIC y ENSEMBLE), ET_o y NDVI por grupo de cultivo clasificado. Las barras de error representan la dispersión entre todos los píxeles de un mismo grupo de cultivo.

La Figura 3 muestra la evaluación del acumulado de consumo de agua de los cultivos (una vez sustraída la P efectiva) de las estimaciones de ET (RS-SWB y METRIC) por municipio y campaña de riego frente a las NIR recogidas por los contadores de agua. En ambos casos se obtiene un $R^2 \approx 0,81$, un bias de $0,02 \text{ hm}^3$ con RS-SWB y de $0,21 \text{ hm}^3$ con METRIC, y un error cuadrático medio (RMSE) de $\pm 0,54 \text{ hm}^3$ con RS-SWB y de $\pm 0,51 \text{ hm}^3$ con METRIC. Además de esta escala de agregación por municipios, los acumulados totales estimados para 2021, 2022 y 2023 en El Carracillo a partir de ET (RS-SWB) son $11,41$, $13,04$ y $12,39 \text{ hm}^3/\text{año}$, y para ET (METRIC) $10,66$, $11,21$ y $10,92 \text{ hm}^3/\text{año}$, frente a $12,59$, $12,25$ y $12,41 \text{ hm}^3/\text{año}$ de NIR registrada por los contadores, confirmando así la ligera infraestimación que bien puede ser debida a las propias incertidumbres de los modelos, a la aplicación de una eficiencia global del 75% o a la combinación de ambos factores.

Finalmente, el análisis en los resultados a partir de la integración de ambos modelos, ET (ENSEMBLE), los principales estadísticos son muy similares en la evaluación por municipio y campaña de riego, (Figura 3, $R^2 \approx 0,81$, bias de $0,12 \text{ hm}^3$ y RMSE de $\pm 0,52 \text{ hm}^3$) y un acumulado total por campaña de $11,04$, $12,12$ y $11,66 \text{ hm}^3/\text{año}$, de nuevo algo inferiores a los registrados por las NIR de los contadores.

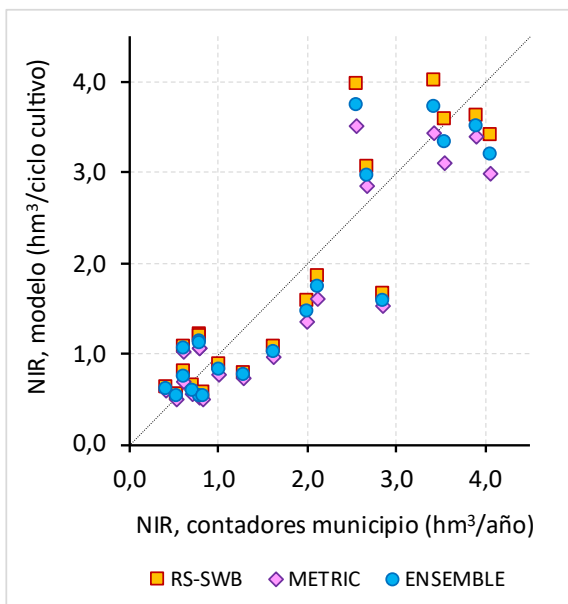


Figura 3. Evaluación de las estimaciones de consumo de agua de riego, tras considerar la P efectiva, a partir de la ET (RS-SWB, METRIC y ENSEMBLE) frente a las NIR por término municipal y campaña de riego (2021-2023).

4. CONCLUSIONES

Tras esta primera experiencia a escala de comunidad de regantes de integración o ensemble de varios modelos basados en teledetección (RS-SWB y METRIC) para contabilizar el agua consumida por los cultivos en regadío, ET (ENSEMBLE), podemos concluir que se observa una gran similitud entre las estimaciones a través del balance de agua asistido por Teledetección y del balance de energía, con diferencias en algunas fases

del crecimiento, más acusadas para ciertos grupos de cultivo, que merecen un análisis más detallado y pausado más adelante. El buen acuerdo entre los resultados y los datos netos de agua de riego registrados directamente en los contadores son prometedores, y muestran el potencial y fiabilidad de las técnicas basadas en Teledetección para el seguimiento y contabilidad del agua empleada por los cultivos en regadío en extensas superficies, al tiempo que permiten cuantificar las incertidumbres cometidas. Esto resulta de particular interés para los gestores del agua, pues permite disponer de una herramienta operativa a escala nacional.

No obstante, conviene ser cautos e investigar en mayor profundidad esta experiencia, con el fin de acotar y proporcionar las incertidumbres asociadas al uso de diferentes datos meteorológicos, estudiar tipos concretos de cultivos, y extender su aplicación a diferentes zonas regables. El trabajo también se podría beneficiar de las medidas de una red extensa de observaciones de ET que permita una validación independiente a los registros de una red de contadores.

5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el European Research Council, proyecto "Water Theft" (Grant agreement ID: 101124884) y por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, junto con FEDER,UE, a través del 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\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Foster, T., Mieno, T., & Brozović, N. (2020). Satellite-Based Monitoring of Irrigation Water Use: Assessing Measurement Errors and Their Implications for Agricultural Water Management Policy. *Water Resources Research*, 56(11), e2020WR028378. <https://doi.org/10.1029/2020WR028378>
- Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., Campos, I., Osann, A., González-Gómez, L., & Calera, A. (2020). Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agricultural Water Management*, 238, 106236. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106236>
- Molina-Medina, A., Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., & Calera, A. (2024). Balance de agua en el suelo asistido por Teledetección sobre el acuífero Los Arenales-Tierra de Pinares para el seguimiento de extracciones de agua de riego. *Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades Para Un Crecimiento Azul. XX Congreso de La Asociación Española de Teledetección.*, 543–546. <http://www.aet.org.es/?q=congresos>