

Evaluación de variables agrometeorológicas mediante teledetección y su aplicación a la optimización del uso del agua

M. Cruz-Blanco, C. Santos, J. M. Ramírez-Cuesta e I. J. Lorite

Centro IFAPA Alameda del Obispo. Córdoba (España)

En climas áridos y semi-áridos un porcentaje muy significativo de los recursos hídricos disponibles son consumidos por la agricultura de regadío. Así, según diversos autores en España más del 80% de los recursos hídricos se dedican al riego. Sin embargo esta distribución de los recursos disponibles podría variar de forma significativa en las próximas décadas debido al incremento en los requerimientos de otros sectores como el medio ambiental, y la prevista reducción de precipitaciones por los efectos del cambio climático en el Sur de Europa¹. En este contexto de máxima competitividad por los recursos hídricos, un correcto manejo de los mismos es esencial para asegurar la sostenibilidad de las zonas regables mediterráneas. Para lograr este correcto manejo, la determinación precisa de variables como la evapotranspiración de los cultivos²

(ET_c) o la evapotranspiración de referencia³ (ET_o) es esencial.

La contribución de las técnicas de teledetección⁴ en la mejora de la gestión de los recursos hídricos a escala de cuenca o zona regable se ha incrementado significativamente en los últimos años. Estas técnicas permiten obtener información precisa de la superficie terrestre (ET_c) y de las condiciones atmosféricas (ET_o). La teledetección ha sido empleada con gran éxito por investigadores como Bastiaanssen *et al.* (1998) o Allen *et al.* (2007a, b), desarrollando nuevas e innovadoras metodologías para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c). Así, herramientas como el modelo METRIC⁵ han permitido determinar la ET_c tanto en cultivos herbáceos (Allen *et al.*, 2007a, b)

¹ Son múltiples los estudios realizados sobre el efecto del cambio climático para las condiciones del sur de España como por ejemplo los trabajos realizados por Christensen y Christensen (2007).

² La evapotranspiración de los cultivos es la combinación de dos procesos mediante los cuales se transfiere agua hacia la atmósfera, debido a la evaporación desde el suelo y a la transpiración de las plantas. Con la práctica del riego se pretende cubrir esta pérdida de agua de modo que los cultivos no sufran estrés hídrico.

³ La evapotranspiración de una superficie de referencia es aquella que se produce con un cultivo herbáceo, como una pradera de gramíneas, con una altura de entre 8 y 15 cm, con un adecuado suministro de agua y nutrientes y en óptimas condiciones de crecimiento. Este término es básico para la programación de riegos como se describe en Allen *et al.* (1998).

⁴ Las técnicas de teledetección se refieren a diversas herramientas utilizadas para la observación, el análisis e interpretación de fenómenos terrestres a partir de imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas o espaciales.

⁵ Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration.

como en cultivos leñosos (Santos *et al.*, 2012), con resultados muy satisfactorios. Estas metodologías han proporcionado información relevante sobre necesidades de agua de los cultivos permitiendo la mejora de la gestión de los recursos hídricos (Santos *et al.*, 2008) o el seguimiento de la sequía (Sun *et al.*, 2011). Estudios llevados a cabo para la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) han sido menos numerosos, aunque recientemente De Bruin *et al.* (2010) y Cruz-Blanco *et al.* (2014) han demostrado que información de satélites geoestacionarios⁶ como el *Meteosat Second Generation* (MSG), pueden ser utilizados para la determinación precisa de ET_0 a escala regional.

El concepto de evapotranspiración de referencia (ET_0) fue introducido para estimar las necesidades de agua de los cultivos junto con el uso de coeficientes de cultivo⁷ (Allen *et al.*, 1998). La metodología de cálculo se basa en la ecuación de Penman-Monteith⁸ y es considerada como el procedimiento de referencia para la determinación de la ET_0 , obteniendo resultados muy satisfactorios incluso en condiciones de gran aridez. La limitación del empleo de esta ecuación es la gran cantidad de información necesaria, siendo complicada su aplicación en áreas donde no se cuenta con información meteorológica de calidad (Martínez-Romero *et al.*, 2012). Por ello, se ha potenciado la búsqueda de metodologías alternativas que requieran una menor cantidad de información. Así, para la determinación de la ET_0 se han empleado con gran éxito metodologías que integran técnicas de teledetección y herramientas de previsión meteorológica en distintas zonas semi-áridas (De Bruin *et al.*, 2010; Cristóbal y Anderson, 2012). Sin embargo, la determinación del impacto del uso de estas metodologías sobre la gestión de los recursos hídricos no ha sido estudiada en detalle hasta fechas recientes.

⁶ Satélite que permanece inmóvil sobre un determinado punto del planeta.

⁷ Es el cociente entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_0) y depende fundamentalmente del desarrollo del cultivo.

⁸ Ecuación frecuentemente empleada para determinar la ET_0 a partir de datos de temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad del aire (Allen *et al.*, 1998).

En este trabajo se muestran los últimos avances en la mejora de la gestión de los recursos hídricos a nivel de parcela, zona regable y región, empleando diferentes técnicas de teledetección. Estas técnicas han permitido determinar de manera precisa diferentes variables agroclimáticas como la ET_c y la ET_0 , constituyendo la base para la optimización del uso del agua en regiones mediterráneas.

¿CÓMO DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN?

Tradicionalmente la evapotranspiración de referencia se ha determinado por medio de redes de información agroclimática. En Andalucía desde finales de los años 90 se emplea la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA). La RIA forma parte del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) creado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://portal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>). Esta red en Andalucía está compuesta en la actualidad por 100 estaciones meteorológicas automáticas que proporcionan diariamente información agroclimática de forma gratuita (<http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria>). Cada estación está equipada con sensores para medir temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, y lluvia. Con esta información, empleando la ecuación de Penman-Monteith, se obtienen valores de ET_0 de gran calidad que sirven de referencia para la programación de riegos de las grandes zonas regables andaluzas.

El cálculo de la ET_0 se debería realizar en condiciones de referencia muy concretas⁹, pero éstas son muy difíciles de conseguir especialmente en climas semi-áridos como los presentes en el sur de España. A pesar de esta limitación, los valores de ET_0 proporcionados por las redes de esta-

⁹ Las condiciones que debe de cumplir una superficie de referencia se describen en Allen *et al.* (1998) y que permiten obtener un valor estandarizado de ET_0 . Algunos de estos requisitos se describen en la nota 3.

ciones meteorológicas presentan una gran calidad como han demostrado trabajos realizados en condiciones semi-áridas descritos en Gavilán *et al.* (2006) y Cruz-Blanco *et al.* (2014). Así, la ecuación de Penman-Monteith ha demostrado su utilidad para generar estimaciones muy precisas al ser comparada con medidas lisimétricas¹⁰ en ambientes mediterráneos.

Aunque los resultados obtenidos con la ecuación de Penman-Monteith han sido muy satisfactorios, su uso se ha visto limitado debido a la necesidad de una gran cantidad de información en condiciones de referencia. Así, a pesar del elevado número de estaciones integradas en la RIA, aún hay zonas en donde la información agroclimática es deficiente por su lejanía a una estación meteorológica. Por este motivo es preciso el desarrollo de metodologías alternativas a la ecuación de Penman-Monteith para el asesoramiento y mejora de la gestión de los recursos hídricos en estas zonas.

EUMETSAT LSA SAF¹¹ es un grupo especializado en el desarrollo de aplicaciones relacionadas con la teledetección para el estudio de procesos que ocurren sobre la superficie terrestre. LSA SAF determina la radiación solar incidente sobre la superficie por medio de la acumulación de observaciones realizadas cada 30 minutos, proporcionadas por instrumentación a bordo del satélite *Meteosat Second Generation* (MSG). Integrando la radiación medida por LSA SAF con la temperatura del aire obtenida por la predicción meteorológica realizada por el Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico (ECMWF), se obtuvieron valores de ET_o basados en la ecuación de Makkink¹². Esta infor-

¹⁰ Medidas realizadas en contenedores que encierran una porción de suelo donde es implantado un cultivo para determinar la evapotranspiración del mismo (Berengena y Gavilán, 2005). Estos contenedores son pesados en intervalos regulares de tiempo, siendo el consumo de agua del cultivo la diferencia de peso entre medidas.

¹¹ LSA SAF es el acrónimo de Land Surface Analysis Satellite Applications Facility, y EUMETSAT de European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (Trigo *et al.*, 2011).

¹² La ecuación de Makkink fue desarrollada inicialmente por De Bruin *et al.* (1998) para climas del norte de Europa, muy diferentes a los encontrados en las condiciones mediterráneas del sur de Europa. Su uso en España requiere de ajustes específicos para las condiciones climáticas de climas mediterráneos.

mación está disponible en tiempo real (<http://landsaf.meteo.pt>), con una resolución espacial de 3 km cubriendo un área que engloba África, la mayoría de Europa y parte de Sudamérica.

En este trabajo se ha realizado una modificación a la formulación original para tener en cuenta las condiciones atmosféricas de climas semi-áridos como las presentes en Andalucía. El ajuste de esta nueva ecuación se realizó empleando información procedente de un lisímetro de pesada¹³ situado en la finca Alameda del Obispo en Córdoba.

Además de la ET_o , la evapotranspiración real de los cultivos (ET_c) es la principal información para estimar las necesidades hídricas de los mismos, y aplicar así el riego en la proporción adecuada. Por ello, una cuantificación precisa de la ET_c constituye una herramienta fundamental en el manejo del agua, al permitir la realización de múltiples aplicaciones como la programación de riegos o la identificación de situaciones de estrés.

Son múltiples los procedimientos de cálculo de la ET_c . Algunos de los métodos tradicionalmente empleados son la lisimetría, las medidas meteorológicas a nivel de parcela, o mediante metodologías simples con valores tabulados como las descritas en Allen *et al.* (1998).

Recientemente las técnicas de teledetección han supuesto un avance muy significativo en este campo. Así, el modelo METRIC ha sido desarrollado por la Universidad de Idaho (EEUU) para la estimación de la ET_c empleando técnicas de teledetección, y ha sido aplicado y validado con éxito en diferentes lugares de todo el mundo. En METRIC, la ET_c se determina empleando imágenes procedentes de los satélites Landsat, y recientemente ha sido adaptado a condiciones mediterráneas para cultivos herbáceos y leñosos por Santos *et al.* (2008; 2012).

¹³ Cuando el cultivo implantado en el lisímetro es una pradera de gramíneas con las características descritas en la nota 3, las medidas realizadas son de evapotranspiración de referencia. Estos valores tienen una gran precisión y son de suma utilidad para el ajuste de ecuaciones más simples a las condiciones climáticas regionales.

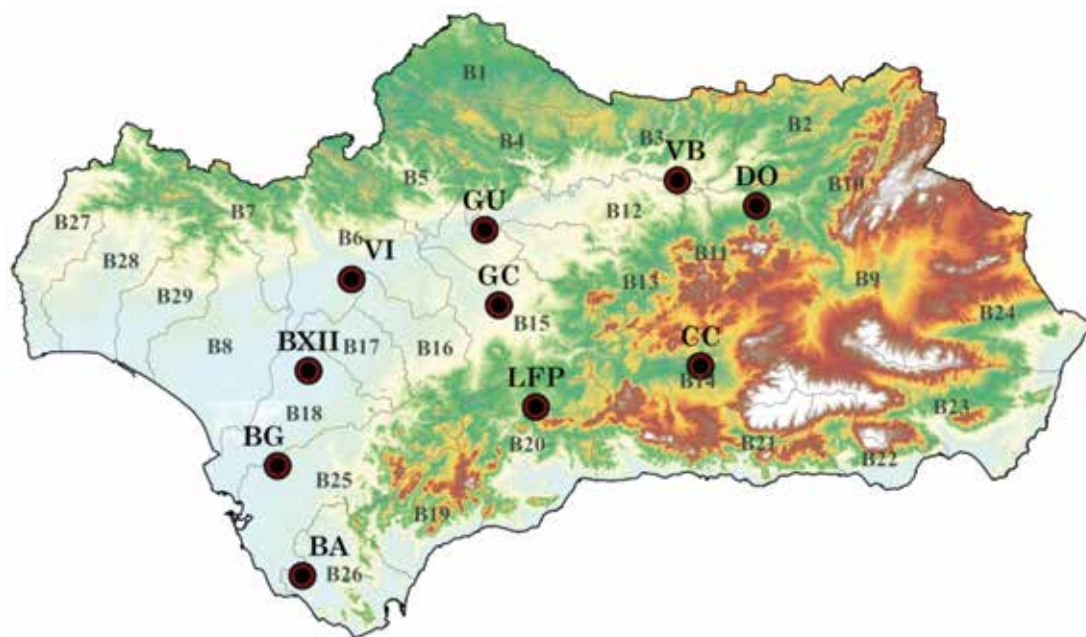


Figura 1. Localización de las 10 zonas regables y de las 29 subcuencas utilizadas en el estudio.

¿CÓMO REALIZAR UNA PROGRAMACIÓN DE RIEGOS O UNA ESTIMACIÓN DE COSECHA?

La determinación del calendario de riegos para un cultivo o la estimación de la cosecha son procesos complejos en los cuales intervienen una gran cantidad de factores, y para cuyo desarrollo se emplean modelos de simulación.

Recientemente FAO¹⁴ ha desarrollado el modelo AquaCrop¹⁵. Este modelo ha sido usado para diferentes cultivos en todo el mundo bajo diversas condiciones climáticas, teniendo entre otras aplicaciones el diseño de estrategias de riego deficitario y el desarrollo de modelos económicos para apoyo en la toma de decisiones (Geerts *et al.*, 2010; García-Vila y Fereres, 2012).

El modelo AquaCrop permitió evaluar la calidad de la información agrometeorológica proporcionada por las técnicas de teledetección, por medio del análisis de la programación de riegos y la estimación de cosecha para el cultivo

del maíz en 10 zonas regables bajo las condiciones climáticas del sur de España.

La región de Andalucía, situada al sur de España, ha constituido la zona de estudio donde se han desarrollado algunas de las aplicaciones más novedosas usando técnicas de teledetección para la determinación de variables agro-climáticas. Para ilustrar la aplicación de técnicas de teledetección en aspectos hidrológicos, la región ha sido dividida en 29 subcuencas (Figura 1), mientras que para ilustrar el impacto del empleo de las técnicas de teledetección sobre la gestión de los recursos hídricos en el regadío se han seleccionado 10 zonas regables, centrándonos en la zona regable del Genil-Cabra (GC en la Figura 1) para la aplicación del modelo METRIC.

ALGUNAS APLICACIONES PRÁCTICAS DEL EMPLEO DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE VARIABLES AGROMETEOROLÓGICAS

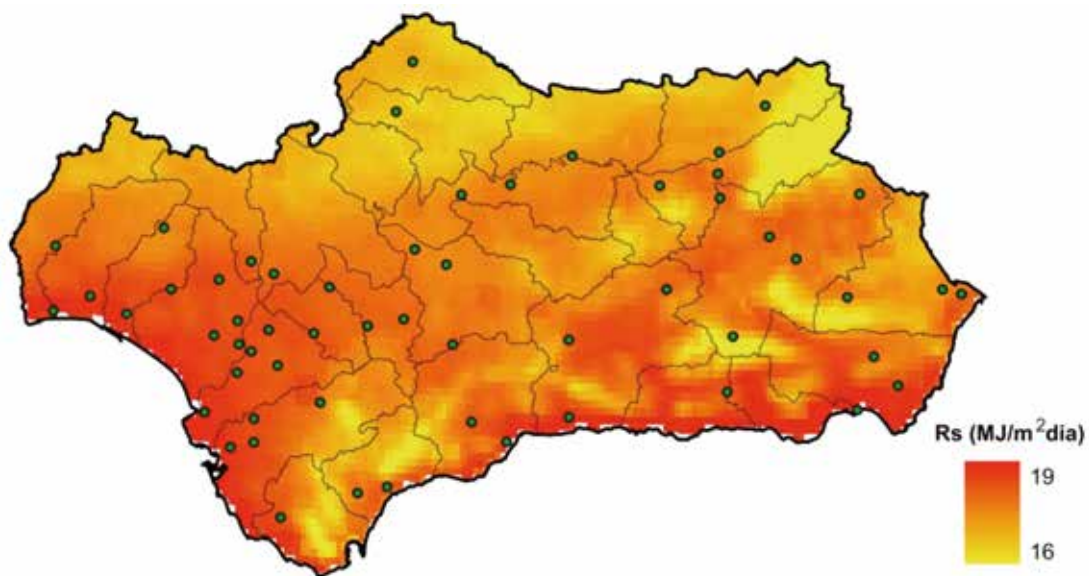
a) Radiación solar y evapotranspiración de referencia

La radiación solar (R_s) es un componente básico para la determinación de las necesidades hídi-

¹⁴ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

¹⁵ Modelo de cultivo que se centra en la simulación de la cosecha en condiciones de limitación de agua (Steduto *et al.*, 2012).

Figura 2. Mapa de radiación solar (R_s) media diaria para Andalucía en el año 2007. Los círculos indican la posición de las estaciones meteorológicas disponibles de la red SIAR.



cas de los cultivos al ser la fuente de energía del proceso de la evapotranspiración. La radiación estimada con técnicas de teledetección obtuvo muy buenos resultados en comparación con las mediciones obtenidas por la estación meteorológica de la red SIAR situada en Córdoba. Así los resultados empleando técnicas de teledetección fueron ligeramente inferiores a los observados por la estación meteorológica, con una subestimación media de $0,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, correspondiente a errores relativos por debajo del 10%. Los mapas de R_s acumulada proporcionados por la nueva metodología permiten realizar estudios sobre la evolución de la radiación a lo largo del año con una resolución espacial¹⁶ muy precisa. Así en la Figura 2 se observa el valor diario medio para Andalucía, donde en las zonas costeras y áridas se encontraron los valores más altos (con valores de R_s alrededor de $19,1 \text{ MJ/m}^2$). El Valle del Guadalquivir presentó valores máximos en torno a $17,6 \text{ MJ/m}^2$, mientras que en las zonas montañosas los valores de R_s no rebasaron los $15,9 \text{ MJ/m}^2$.

La determinación precisa y espacialmente distribuida¹⁷ de la ET_0 es uno de los mayores retos

¹⁶ Se puede definir como el tamaño del objeto más pequeño capaz de ser observado en una imagen. Esta resolución viene fijada por el tamaño del pixel que constituye una imagen. Por ejemplo el satélite Landsat proporciona imágenes con una resolución espacial de 30 metros y el satélite MSG de 3 kilómetros.

¹⁷ Información disponible para la totalidad de celdas en las que puede ser dividido un territorio.

en los ámbitos de la agronomía y la hidrología. Para mostrar la contribución de las técnicas de teledetección, basándose en los mapas de radiación previamente descritos, se determinó la evapotranspiración de referencia a escala diaria para una región semi-árida situada al sur de España. Gracias al empleo de técnicas de teledetección se obtuvieron mapas diarios de ET_0 con una resolución espacial de aproximadamente 9 Km^2 , siendo agregados estacional y anualmente. En los mapas de ET_0 anual se detectan diferentes zonas con valores claramente diferentes, con los mayores valores de ET_0 localizados en las secciones media e inferior del Valle del Guadalquivir, en las zonas costeras y en las zonas áridas situadas al Este de Andalucía (Figura 3). El valor máximo de ET_0 estimado para el año 2007 en Andalucía fue en torno a 1390 mm . En el lado opuesto los valores más bajos de ET_0 se encontraron en las zonas montañosas situadas al Este de la región con valores de ET_0 iguales a 1000 mm . Al analizar esta distribución espacial de la ET_0 a escala estacional, la zona de valores máximos se desplazó desde la zona media-superior del Valle del Guadalquivir en verano, hasta las zonas costeras y la sección inferior del Valle del Guadalquivir en invierno.

Las diferencias medias en la estimación de la ET_0 entre Penman-Monteith y el empleo de técnicas de teledetección fueron muy peque-

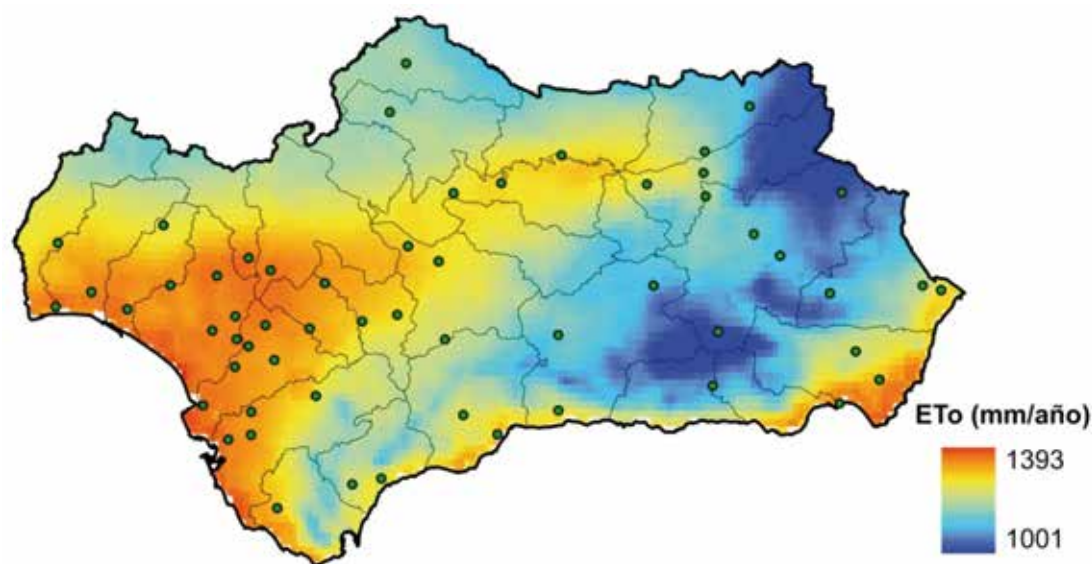


Figura 3. Evapotranspiración de referencia (ET_0) diaria acumulada en Andalucía para el año 2007 utilizando técnicas de teledetección.

ñas, con una subestimación generada con las técnicas de teledetección del 3.3% respecto a la ecuación de Penman-Monteith. Igualmente analizando cada zona de forma individual, las técnicas de teledetección generaron aceptables valores extremos, oscilando entre subestimaciones máximas del 10.2% y sobreestimaciones máximas del 6.9%.

Otra aplicación del empleo de técnicas de teledetección fue la determinación de la variabilidad de la ET_0 en las diferentes subcuencas en las que se dividió el territorio andaluz (Figura 3). Así, algunas cuencas mostraron una gran variabilidad de ET_0 , como la cuenca denominada Guadalquivir del Guadalbullón al Guadajoz que varió entre 1000 y 1310 mm. Igualmente se determinó que la variabilidad espacial de la ET_0 fue mayor durante invierno y otoño, comparada con la encontrada durante la primavera y verano. Esta gran variabilidad pone de relieve la gran incertidumbre en el uso de valores de ET_0 proporcionados por redes de estaciones meteorológicas, donde las medidas de ET_0 son puntuales y con frecuencia no representativas de zonas incluso cercanas geográficamente (Figura 3).

Estos resultados muestran el gran potencial del empleo de técnicas de teledetección aplicadas a la determinación de variables agrometeorológi-

cas, permitiendo la obtención de mapas diarios de radiación solar y ET_0 con una resolución espacial precisa a nivel regional.

b) Mejora de la programación de riegos

Aunque la programación de riegos está directamente relacionada con la precipitación, la ET_0 también juega un papel importante y por lo tanto el método para determinar la ET_0 afecta de manera significativa a la programación de riegos. Esta circunstancia hace necesaria la búsqueda de métodos alternativos a la ecuación de Penman-Monteith, la cual como anteriormente se expuso, requiere del uso de una gran cantidad de información meteorológica muchas veces no disponible.

Para cuantificar el efecto del método de cálculo de la ET_0 , se procedió a la programación de riegos para el cultivo de maíz con el modelo AquaCrop, basándose en los valores de ET_0 calculados por la ecuación de Penman-Monteith y otras metodologías alternativas, como las técnicas de teledetección o una metodología que tiene en cuenta una práctica habitual de agricultores y técnicos cuando no se dispone de información meteorológica de una estación cercana, y que consiste en utilizar los datos de la estación disponible más próxima.

El uso de Penman-Monteith generó un volumen de riego medio de 520 mm variando desde 442 mm para la zona regable del Bajo Guadalquivir (BG), a 635 mm para la zona regable de Laguna Fuente (LFP) Piedra. Usando como referencia los volúmenes de riego determinados con Penman-Monteith, las técnicas de teledetección generaron una subestimación media muy limitada del 2,6%. Considerando individualmente las zonas regables y campañas de riego, la máxima subestimación fue de alrededor del 14%, mientras que la máxima sobreestimación fue del 12%. Así, aquellas zonas con mayores diferencias en ET_0 al emplear Penman-Monteith frente al uso de la teledetección fueron las zonas con mayores diferencias entre volúmenes de riego (zonas regables de Donadío y Canal del Cacín). Finalmente, utilizando la estación disponible más cercana se generaron volúmenes de riego próximos a los generados con Penman-Monteith, con sobreestimaciones del 0,5%. Sin embargo, al analizar cada zona regable de forma individual se determinaron importantes divergencias, con errores máximos en torno al 13%. Las diferencias específicas para cada zona se compensaron al calcular el valor medio, pero son reveladas al realizar el estudio de forma específica para cada zona y campaña de riegos.

En condiciones semi-áridas caracterizadas por escasas precipitaciones, la producción de maíz es claramente dependiente de la cantidad de riego aplicado, pero también es preciso tener en cuenta el momento de aplicación de ese volumen de riego. De esta forma la cosecha obtenida se convierte en un excelente indicador de la calidad de la programación de riego realizada, puesto que otros factores no asociados al riego como plagas o enfermedades no son considerados para la estimación de cosecha por el modelo AquaCrop.

La cosecha media de maíz estimada por el modelo AquaCrop para las 10 zonas regables consideradas en el estudio (Figura 1) empleando la ET_0 de Penman-Monteith fue de 12,6 t/ha. Usando los calendarios de riego basados en la ET_0 calculada con técnicas de teledetección la

cosecha estimada fue similar (12,3 t/ha), suponiendo una subestimación del 2,2%. Estos valores resaltan la gran calidad de los calendarios generados con técnicas de teledetección. Las pequeñas diferencias en cosecha al emplear técnicas de teledetección en lugar de emplear la ecuación de Penman-Monteith fueron debidas a diferencias en la estimación de la ET_0 , que generaron diferencias en el volumen de riego necesario; así aquellas zonas con mayores diferencias entre volúmenes de riego estimados entre ambas metodologías fueron las zonas con mayores caídas en cosecha (Zonas Regables del Donadío y Canal del Cacín).

Finalmente, los calendarios de riego basados en el uso de la estación meteorológica disponible más cercana proporcionaron valores medios de cosecha satisfactorios, con subestimaciones limitadas al 2,3%. Sin embargo, al analizar específicamente cada zona y campaña de riego los errores generados en los calendarios de riegos produjeron puntuales pero severas caídas en el rendimiento de hasta el 28,9%. Este hecho fue causado por el desajuste de los calendarios de riego a las condiciones meteorológicas locales, generando en determinadas zonas y campañas un significativo estrés en los cultivos. Estos resultados confirman que el uso de información meteorológica de estaciones localizadas lejos de las zonas objeto de estudio puede generar caídas significativas en el rendimiento de los cultivos, y es por ello que su uso debe ser considerado en zonas con un amplio conocimiento de las condiciones meteorológicas, y siempre con cautela.

Considerando estos resultados se ha demostrado la utilidad del empleo de técnicas de teledetección para la generación de calendarios de riego a la hora de mejorar la gestión de los recursos hídricos a escala regional. Sus resultados son comparables a los obtenidos con Penman-Monteith, pero con unos requerimientos de información mucho menores, lo que hace del empleo de las técnicas de teledetección una herramienta de gran utilidad y aplicabilidad a la gestión integral de recursos a nivel de cuenca o región.

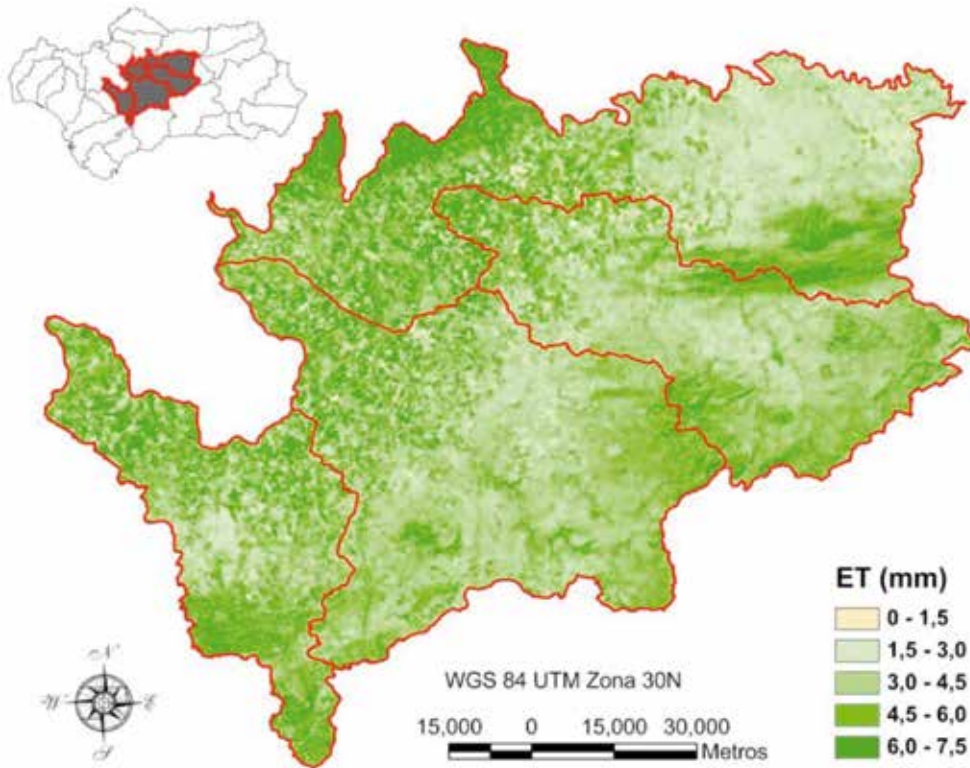


Figura 4. Localización de las subcuencas y mapa de evapotranspiración real diaria de las mismas obtenido con el modelo METRIC para el día 14 de Mayo de 2007.

c) Evapotranspiración de cultivo aplicada a la gestión del riego

El modelo METRIC fue aplicado al Valle del Guadalquivir con imágenes procedentes del satélite Landsat 5 TM. Las imágenes obtenidas tienen una resolución espacial de 30 m para la información similar a la que percibe el ojo humano, y 120 m para la información de temperatura de la superficie terrestre, permitiendo la realización de análisis a diferentes escalas; desde parcela hasta cuenca. El estudio se ha centrado en diferentes subcuencas del Río Guadalquivir (Guadajoz, Bajo Genil, Corbones y Guadalquivir del Guadalbullón al Guadajoz; Figura 4), situadas en Andalucía, sur de España. La Figura 4 muestra la localización de dichas subcuencas y un mapa de evapotranspiración real (ET_c) diaria de las mismas obtenido con el modelo METRIC para un día de primavera del año 2007.

Los valores medios de ET_c diarios de cada subcuenca resultaron semejantes entre sí, con valores cercanos a los 4 mm. Sin embargo,

dentro de cada subcuenca se detectó una gran variabilidad, llegando a alcanzar el 40% en la subcuenca denominada Guadalquivir del Guadalbullón al Guadajoz. Esta alta variabilidad fue causada por la diferencia de manejos y cultivos, y justifica la necesidad de realizar análisis espacialmente distribuidos, siendo las técnicas de teledetección herramientas de gran utilidad para este fin. El cociente entre la ET_c (que caracteriza el estado de los cultivos) y la ET_o obtenida mediante técnicas de teledetección dio como resultado los llamados coeficientes de cultivo reales (K_c) de cada subcuenca, demostrando el gran potencial de la combinación de ambas metodologías descritas en este trabajo. El conocimiento preciso de los coeficientes de cultivo es fundamental para una correcta gestión de los recursos hídricos y son la base para la programación de riegos.

La aplicación de técnicas de teledetección y el modelo METRIC también proporcionó otras variables de gran utilidad a la hora de la caracterización de la superficie terrestre. Así, información

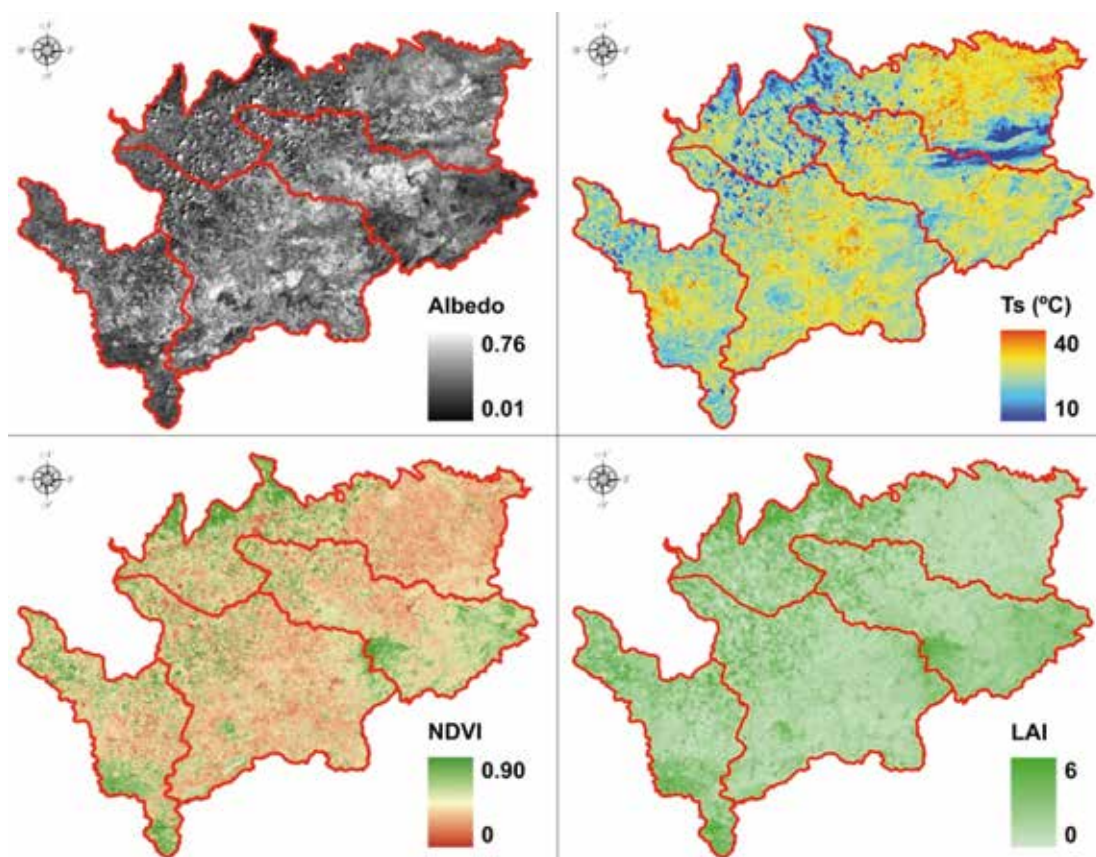


Figura 5. Mapas de albedo, temperatura superficial, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y LAI (*Leaf Area Index*) del día 14 de mayo de 2007 obtenidos con el modelo METRIC.

relativa a albedo¹⁸, índices de vegetación¹⁹ (como NDVI o LAI), o temperatura de la superficie también fue determinada para las subcuencas consideradas anteriormente (Figura 5).

Estos productos obtenidos con técnicas de teledetección son de suma utilidad para la realización de estudios hidrológicos y evaluación de recursos hídricos subterráneos (Allen *et al.*, 2007b), estudios sobre vegetación de ribera, para la evaluación de cambios de uso de suelo a nivel de cuenca, o para la mejora de la gestión de los recursos hídricos en el regadío (Santos *et al.*, 2008).

Gracias a la resolución espacial del satélite Landsat 5 TM, estos trabajos también han tenido su aplicación a nivel de zona regable y parcela. Así,

¹⁸ Es la relación existente entre la radiación reflejada por un objeto con respecto a la que incide sobre el mismo. Su uso es de gran importancia para conocer la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre.

¹⁹ Son variables que permiten estimar la cantidad, calidad y desarrollo de una cubierta permitiendo conocer el estado general del cultivo.

las técnicas de teledetección han permitido conocer la variabilidad del riego dentro de una zona regable o la uniformidad de aplicación del riego²⁰ en parcela. Estos análisis permiten evaluar la existencia de problemas derivados de un deficiente manejo del riego por parte del agricultor, que tienen como consecuencia la caída de rendimiento y/o el gasto excesivo de agua. Así, una alta variabilidad del manejo indicará que la gestión del riego en la zona no es óptima. Tradicionalmente esta evaluación se realiza por medio del uso de contadores y entrevistas en campo pero esta labor no es fácil de llevar a cabo debido a la deficiente modernización de las zonas y el gran número de usuarios a analizar. En este punto el empleo de técnicas de teledetección a nivel de parcela es una solución muy satisfactoria. En la Figura 6 se muestra la

²⁰ Es un indicador de la forma en la que se ha distribuido el riego en la parcela. Cuanto mayor sea esta uniformidad mejor aplicación del riego se ha realizado permitiendo ahorro de agua y mejora en los rendimientos. Valores mayores al 90% son considerados óptimos mientras que valores por debajo del 50% no son aceptables y deben ser corregidos.

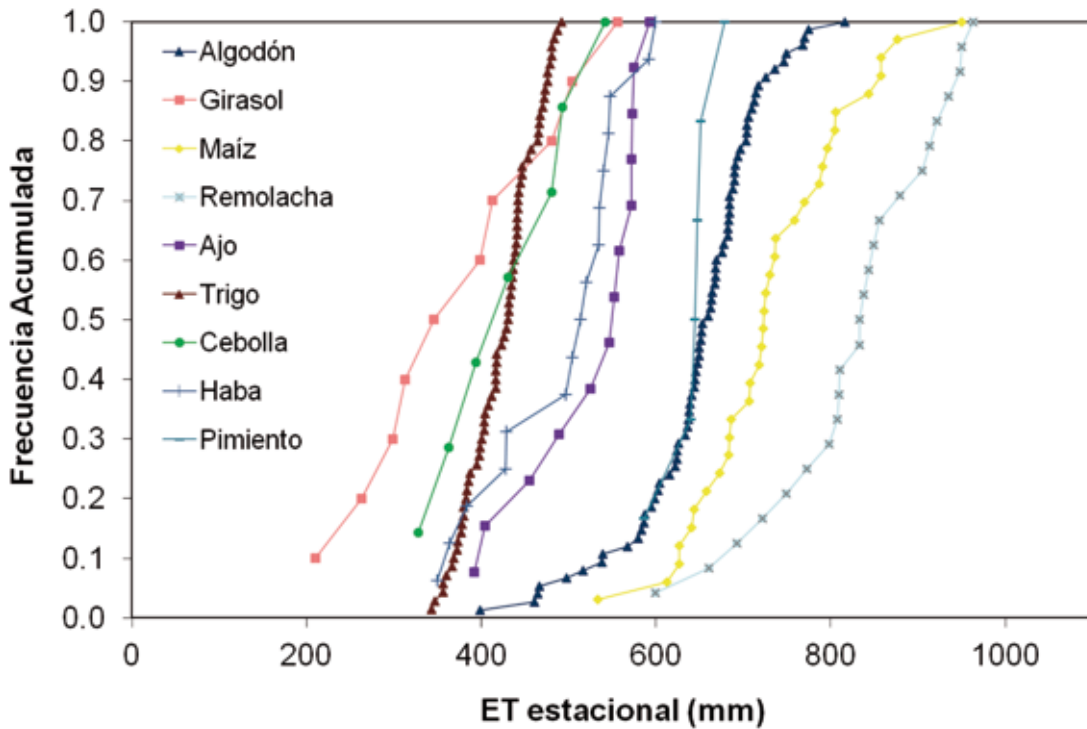


Figura 6. Curvas de frecuencia acumulada de los valores de ET_c estacional en la Zona Regable del Genil – Cabra para los cultivos más representativos.

evapotranspiración de cultivo determinada por METRIC en cada parcela de la Zona Regable del Genil – Cabra, agrupada por cultivos. Se comprueba la gran variabilidad existente en ET_c , lo que es indicador de errores en la gestión del riego en un porcentaje muy significativo de las parcelas, y que difícilmente es detectable sin el uso de técnicas de teledetección.

La información proporcionada por METRIC integrada con un modelo de balance de agua²¹, permite obtener un calendario de riegos específico a cada parcela, ajustado a todas las características específicas del cultivo. De esta forma se puede aportar el riego en el momento más conveniente con un menor consumo de agua. Al comparar los calendarios desarrollados con METRIC con aquellos generados según la metodología propuesta por FAO (Allen *et al.*, 1998) las diferencias fueron muy significativas, generándose en la zona regable del Genil – Cabra un importante ahorro de agua para los cultivos de algodón y maíz (alrededor del 20% y

del 10% respectivamente), y evitando pérdidas por estrés en ajo y remolacha (un 10% y un 21% respectivamente). Esto fue causado por la incapacidad de los modelos tradicionales de detectar cambios en la fecha de siembra, en la duración del ciclo de los cultivos o cualquier otra incidencia que afecte a su desarrollo, los cuales son fácilmente detectados con el empleo de técnicas de teledetección.

Además de la programación de riegos, son múltiples las aplicaciones de la determinación de la ET_c a nivel de parcela que proporciona METRIC. Entre estas aplicaciones destacamos la determinación de la productividad del agua²², la eficiencia del riego²³ aplicado en parcela y del volumen de riego empleado por el agricultor.

Para la determinación de la productividad del agua es preciso estimar la cosecha obtenida. Para la aplicación de esta metodología se escogió la Zona Regable del Genil – Cabra (Córdo-

²¹ Modelo que contabiliza tanto las entradas (lluvia, riego) como salidas (evaporación, transpiración) de agua de la superficie. Su uso es común en todo el mundo para la realización de calendarios de riego (Allen *et al.*, 1998).

²² Se define como el cociente entre la producción obtenida y la cantidad de agua de riego aportada. Es un indicador de gran utilidad para la gestión de los recursos hídricos.

²³ Indicador que considera el agua realmente empleada por el cultivo frente al total aplicado.

ba) en la cual se determinó la cosecha empleando técnicas de teledetección y en la que se obtuvieron resultados muy satisfactorios, con un error medio comprendido entre el 8,7% para el algodón y el 16,5% para la remolacha. Igualmente se determinó que el ajo fue el cultivo con mayor productividad del agua de riego (3 €/m³), mientras que el maíz fue el menos productivo (0,20 €/m³). La determinación precisa de estos valores para cada parcela que compone la zona regable demuestra el potencial de las técnicas de teledetección para el asesoramiento en la mejora de la gestión del riego.

La información sobre ET_c proporcionada por METRIC también puede ser utilizada para establecer la eficiencia del riego en parcela. Para ello es preciso disponer de registros reales de volúmenes de agua aplicados en parcela. Conocer la eficiencia del riego permite identificar aquellas parcelas que podrían necesitar mejoras en la gestión del riego. Así, la eficiencia media en parcela en la Zona Regable del Genil - Cabra se estimó en 0,77, lo cual puede ser considerado como un valor adecuado, pero se detectaron ciertas parcelas con eficiencias inferiores a 0,6, las cuales requieren de una mejora de la gestión del riego.

Finalmente, empleando los valores de ET_c de METRIC también es posible realizar una estimación del volumen de riego aplicado por los agricultores en parcela. Para ello es preciso contar con valores aproximados de eficiencia a nivel de parcela. Su aplicación a la Zona Regable del Genil - Cabra proporcionó resultados muy prometedores siendo una herramienta de gran utilidad para la identificación de riegos procedentes de aguas subterráneas o para el seguimiento de restricciones en el suministro a nivel de parcela y zona regable.

CONCLUSIONES

Las técnicas de teledetección han aportado en los últimos años avances muy significativos en los campos de la agricultura y la hidrología. El empleo de satélites como los de las series Landsat y Meteosat ha supuesto un avance aún ma-

yor, posibilitando el desarrollo de herramientas de gran utilidad para la mejora de la gestión de los recursos hídricos.

El uso de técnicas de teledetección (LSA SAF) junto con herramientas de pronóstico meteorológico (ECMWF) integradas en metodologías ajustadas a las condiciones regionales han permitido determinar la evapotranspiración de referencia a nivel regional. Esta herramienta constituye un avance de gran importancia, en especial para aquellas zonas en las que la disponibilidad de información meteorológica es limitada o de baja calidad. En este estudio se ha mostrado la gran utilidad de esta metodología en la determinación de ET_o para la región de Andalucía. Este trabajo constituye uno de los primeros estudios a nivel europeo de análisis de la ET_o a nivel regional, sin la necesidad de contar con una densa red de estaciones meteorológicas, evitando los altos costes asociados y las incertidumbres en la medida causadas por deficientes condiciones de referencia y mantenimiento. Otra aplicación de las técnicas de teledetección ha sido su empleo en la determinación de calendarios de riegos adaptados a las condiciones meteorológicas presentes en la zona específica de estudio, sin necesidad de recurrir a procedimientos con altos requerimientos de información. Así el empleo de técnicas de teledetección frente al uso de la ecuación de Penman-Monteith generó diferencias muy pequeñas en la programación de riegos y en la cosecha simulada para maíz en diferentes zonas andaluzas (diferencias del 2,6 y 2,2% respectivamente).

En el ámbito de la evapotranspiración de los cultivos los avances no han sido menos significativos. Modelos de simulación junto a imágenes del satélite Landsat han permitido realizar estudios para la programación de riegos ajustados a las condiciones locales de cada finca, y para la determinación de incidencias (falta de uniformidad de riego, plagas o enfermedades) que se reflejen en la generación de estrés a los cultivos. Además, el empleo del modelo METRIC para la estimación de la eficiencia del riego aplicado en parcela para la estimación de

volúmenes de riego aplicado o para la determinación de la productividad del agua han contribuido de forma decisiva en la mejora de la gestión de los recursos hídricos.

Este trabajo ha tratado de mostrar algunos de los últimos avances en técnicas de teledetección aplicadas a la mejora de la gestión de los recursos hídricos. Nuevos satélites y metodologías contribuirán en el medio plazo a esta tarea por medio de la mejora en la resolución espacial y temporal de las medidas, siendo capaces de generar herramientas de asesoramiento integral, asegurando la sostenibilidad de los sistemas agrarios y forestales en el futuro. Si bien el estudio se ha centrado en Andalucía, las metodologías aquí descritas son de total aplicación al resto de España y constituyen herramientas de suma utilidad para la mejora de la gestión de los recursos hídricos en la totalidad del estado español.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos P10-EXC10-0036/AGR-6126 y PR.AVA.AVA201301.10 de la Junta de Andalucía y por el proyecto RTA2011-00015-00-00 del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), y ha sido supervisado por EUMETSAT, la Universidad de Idaho, EEUU, y la Universidad de Córdoba. ❀

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56. FAO, Roma.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *J Irrig Drain Eng ASCE*, 133 (4), 380-394.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I.J., Robison, C.W., 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. *J Irrig Drain Eng ASCE*, 133(4), 395-406.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J Hydrol*, 212-213, 198-212.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., 2007. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, 81, 7-30.
- Cristobal, J., Anderson, M.C., 2012. Regional scale evaluation of a MSG solar radiation product for evapotranspiration modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 9, 8905-8939.
- Cruz-Blanco, M., Lorite, I.J., Santos, C., 2014. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. *Agric. Water Manage*, 131, 135-145.
- De Bruin, H.A.R., Lablands, W.N., 1998. Reference crop evapotranspiration determined with a modified Makkink equation. *Hydrol. Process*, 12, 1053-1062.
- De Bruin, H.A.R., Trigo, I.F., Jitan, M.A., Temesgen, E.N., van der Tol, C., Gieske, A.S.M., 2010. Reference crop evapotranspiration derived from geo-stationary satellite imagery: a case study for the Fogera flood plain, NW-Ethiopia and the Jordan Valley, Jordan. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 14, 2219-2228.
- Fisher, D.K., Pringle III, H.C., 2010. Effect of reference ET method on irrigation scheduling model. In: 5th National Decennial Irrigation Conference. Paper number: IRR10-9814. Phoenix, Arizona, USA.
- García-Vila, M., Fereres, E., 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron*, 36, 21-31.
- Gavilán, P., Lorite, I.J., Tornero, S., Berengena, J., 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ETo in a semiarid environment. *Agric. Water Manage*, 81, 257-281.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agric. Water Manage*, 98, 213-216.
- Lorite, I.J., García-Vila, M., Carmona, M.A., Santos, C., Soriano, M.A., 2012. Assessment of the Irrigation Advisory Services' recommendations and farmers' irrigation management: a case of study in Southern Spain. *Water Resour. Manage*, 26, 2397-2419.
- Martínez-Romero, A., Ortega, J.F., de Juan, J.A., Tarjuelo, J.M., Moreno, M.A., 2012. Estimating models of global solar radiation with limiting data and its spatial distribution in Castilla-La Mancha. *ITEA-InformaciónTécnica Económica Agraria*, 108 (4) 426-449.
- Pereira, A.R., Pruitt, W.O. 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agric. Water Manage*, 66, 251-257.
- Santos, C., Lorite, I.J., Tasumi, M., Allen, R.G., Fereres, E., 2008. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrig Sci*, 26, 277-288.
- Santos, C., Lorite, I.J., Allen, R.G., Tasumi, M., 2012. Aerodynamic parameterization of the Satellite-Based Energy Balance (METRIC) model for ET estimation in rainfed olive orchards of Andalusia, Spain. *Water Resources Management*, 26, 3267-3283
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D., 2012. Crop Yield Response to Water. *FAO. Irrigation and Drainage Paper*, vol. 66. FAO, Rome.
- Sun, Z., Gebremichael, M., Ardö, J., de Bruin, H.A.R., 2011. Mapping daily evapotranspiration and dryness index in the East African highlands using MODIS and SEVIRI data. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 15, 163-170.
- Trigo, I.F., Dacamara, C.C., Viterbo, P., Roujean, J.L., Olesen, F., Barroso, C., Camacho-de-Coca, F., Carrer, D., Freitas, S.C., García-Haro, J., Geiger, B., Gellens-Meulenberghs, F., Ghilain, N., Meliá, J., Pessanha, L., Siljamo, N., Arbolada, A., 2011. The satellite application facility for land surface analysis. *Int. J. Remote Sens*, 32, 2725-2744.