

Evolución de la evapotranspiración y el estrés hídrico de la vegetación de dehesa en la Península Ibérica (2001-2015)

González-Dugo, M.P.*¹, Chen, X.², Andreu, A.³, Carpintero, E.¹, Gómez-Giráldez, P.¹, Su, Z.²

1 IFAPA, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Apdo. 3048 ES-14071 Córdoba, España.

2 Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Universidad de Twente, Enschede, Países Bajos.

3 UNU-FLORES, Ammonstrasse 74, Dresden, 01067, Alemania.

Resumen: Este trabajo pretende profundizar en el efecto del déficit de agua en el suelo sobre la vegetación de los ecosistemas de dehesa. Para ello, se ha realizado un seguimiento de la evapotranspiración (ET) y el estrés hídrico de este sistema en la Península Ibérica a lo largo quince años, mediante la aplicación de un modelo de balance de energía basado en datos térmicos procedentes de imágenes de satélite. El modelo SEBS (*Surface Energy Balance System*) se ha aplicado, a escala mensual desde enero de 2001 a diciembre de 2015, haciendo uso de datos remotos e información meteorológica procedente de reanálisis. Los resultados han permitido evaluar el funcionamiento del modelo en estas condiciones usando observaciones experimentales, obteniendo estimaciones suficientemente precisas (RMSE=14-20 W·m⁻² para los flujos radiativos y RMSE=26-29 W·m⁻² en los convectivos) para realizar un seguimiento de los flujos de energía, incluyendo ET, y el estrés hídrico de la vegetación en las condiciones estudiadas. Se han caracterizado los principales episodios de sequía ocurridos en dicho período, cuantificando su efecto sobre la cobertura de la vegetación y su producción. Por último, se ha profundizado en el análisis de los dos años más secos de la serie (2004/2005 y 2011/2012) y su impacto sobre los diferentes estratos de vegetación, herbáceo y arbóreo, del ecosistema de dehesa.

Palabras clave: evapotranspiración, balance de energía en superficie, térmico, dehesa, sequía.

Evolution of evapotranspiration and water stress of oak savanna vegetation in the Iberian Peninsula (2001-2015)

Abstract: The objective of this work is to provide new insights on the effect of soil water deficit on the vegetation of Mediterranean oak savanna. The evolution of evapotranspiration (ET) and vegetation water stress over this ecosystem, in the Iberian Peninsula, has been monitored for fifteen years through the application of a remote sensing thermal-based energy balance model. The Surface Energy Balance System (SEBS) has been applied, on a monthly timescale from January 2001 to December 2015, using input satellite and meteorological reanalysis databases. The model performance has been evaluated under these conditions by comparison with field measurements. The estimation of energy fluxes yielded reasonable agreements with observations (RMSE=14-20 W·m⁻² for the radiative fluxes and RMSE=26-29 W·m⁻² for the turbulent ones) and have led to characterize the main drought events that took place during the study period, and to quantify their effects on the vegetation coverage and production. The most generalized and severe events (2004/2005 and 2011/2012) and their impact on different vegetation strata, oaks and grasslands, are further analyzed.

Key words: evapotranspiration, surface energy balance, thermal remote sensing, oak savanna, drought.

To cite this article: González-Dugo, M.P., Chen, X., Andreu, A., Carpintero, E., Gómez-Giráldez, P., Su, Z. 2017. Evolution of evapotranspiration and water stress of oak savanna vegetation in the Iberian Peninsula (2001-2015). *Revista de Teledetección*, 50, 27-36. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.8916>

* Corresponding author: mariap.gonzalez.d@juntadeandalucia.es

1. Introducción

La dehesa es el sistema agroforestal más extenso y mejor conservado de Europa, con una superficie que supera los tres millones de hectáreas en la Península Ibérica (Moreno y Pulido, 2009). Estas sabanas con árboles dispersos, matorral, pasto y cultivos son un ejemplo de uso múltiple del territorio, que combina el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales con la conservación de un ecosistema, de origen antrópico, con un alto valor ambiental. Sin embargo, en las últimas décadas el equilibrio de este sistema se ha visto comprometido por problemas de rentabilidad, de intensificación de su uso y por la incidencia de plagas y enfermedades (Plieninger y Wilbrand, 2001, Corcobado *et al.*, 2013). A estas amenazas hay que sumar su alta vulnerabilidad a los cambios previstos en el clima de la región Mediterránea, con sequías cada vez más extremas, mayor torrencialidad en las precipitaciones y una reducción de los recursos hídricos aprovechables (Kovats *et al.*, 2014).

Al igual que en otros ecosistemas donde el principal factor limitante es el agua, su disponibilidad ejerce un importante control sobre la distribución y el estado de la vegetación en la dehesa. A su vez, la vegetación condiciona la dinámica del agua en el suelo y los principales procesos hidrológicos a escala de cuenca (Rodríguez-Iturbe *et al.*, 2001). Este trabajo pretende avanzar en el conocimiento de estos procesos mediante el seguimiento de la evapotranspiración (ET) y el estrés hídrico de la vegetación de dehesa en la Península Ibérica a lo largo de los últimos 15 años, evaluando el impacto de las principales sequías ocurridas en ese período.

La gran cantidad de datos libres y de acceso gratuito disponibles actualmente a escala global presentan un gran potencial para desarrollar este tipo de seguimiento. En este caso se han usado imágenes de varios satélites a distintas escalas, e información meteorológica producida mediante técnicas de reanálisis. La integración de estos datos en modelos de balance de energía en superficie permite estimar con bastante precisión y de manera robusta los componentes del balance de energía. Estos modelos utilizan la temperatura radiométrica como magnitud primaria para derivar el calor latente o ET (Kustas y Norman, 1996) y en los últimos veinte años se han desarrollado diversas

aproximaciones con diferente nivel de empirismo (Norman *et al.*, 1995, Bastiaanssen *et al.*, 1998, Su, 2002) y, en general, buenos resultados en la estimación de la evapotranspiración tanto en cultivos homogéneos como en cubiertas de vegetación dispersa (González-Dugo *et al.*, 2009, Chen *et al.*, 2014, Andreu *et al.*, 2015).

La evapotranspiración representa las pérdidas totales de agua desde la superficie a la atmósfera, a través de la evaporación y la transpiración. Cuando la disponibilidad de agua en el suelo se convierte en un factor limitante para el crecimiento de las plantas, éstas reaccionan reduciendo el flujo de transpiración con respecto a la demanda atmosférica, normalmente representada mediante la evapotranspiración potencial o de referencia (ET_p). Por ello el cociente ET/ET_p o evaporación relativa (Λ_T), se considera un buen indicador del estrés hídrico de la vegetación. El primer objetivo de este trabajo es analizar las anomalías de Λ_T y su evolución a distintas escalas temporales para caracterizar los períodos secos que han afectado a la vegetación de dehesa durante los quince años de estudio. En segundo lugar, se propone realizar un análisis más detallado de los eventos más severos identificados dentro de la serie, atendiendo especialmente a la respuesta específica de los principales estratos de la vegetación de dehesa, árbol y pasto, a estas situaciones concretas de escasez de agua.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio y zona experimental de validación

La falta de consenso sobre la definición precisa del término *dehesa* dificulta la obtención de estadísticas y cartografía fiables sobre su distribución en el territorio. Debido a ello, las distintas administraciones implicadas en su gestión, a escala nacional y autonómica, emplean criterios diferentes en sus caracterizaciones, lo que complica la integración de muchos de los datos que generan. En este caso, para delimitar como área de estudio todas las dehesas de la Península Ibérica se ha recurrido al mapa de usos del suelo CORINE de la UE (CLC2006. 100 m - versión 12/2009 <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-raster-4>) que aplica un criterio único en

todo el territorio. Además, el área total ocupada por el uso agroforestal en CORINE coincide con datos previos sobre la superficie de dehesa en España y Portugal (Moreno y Pulido, 2009). La Figura 1 presenta la distribución de la dehesa en la Península Ibérica según CLC2006.

Para validar los flujos de energía estimados en este trabajo se han empleado medidas obtenidas en una zona experimental situada sobre un ecosistema típico de dehesa (Santa Clotilde, 38°12' N; 4°17' W, 736 m.s.n.m.) (Figura 1), cuya instrumentación permite la medida precisa y continua de los intercambios de agua, energía y carbono entre la cubierta y la atmósfera. El equipamiento de esta zona incluye dos torres de covarianza de torbellinos (una situada a 18 m que mide la respuesta del sistema en su conjunto y otra a 1,5 m centrada en los intercambios del pasto únicamente, ambas equipadas con sensores de atmósfera y suelo), y dos zonas excluidas al pastoreo con instrumentación complementaria (precipitación, humedad de suelo, temperatura de cubierta, etc.), dentro de las cuales se reproduce el manejo del resto de la explotación.

Los flujos mensuales proporcionados por el modelo se han validado comparándolos con medias obtenidas durante dos años, 2014-2015, en Sta. Clotilde. Para realizar esta comparación el cierre del balance de energía se ha forzado usando el método de los residuos, que asume que el calor sensible (H) es medido correctamente por el sistema de covarianza de torbellinos y la ecuación del

balance (1) se resuelve para obtener la evapotranspiración o calor sensible (λE). Respecto al ajuste espacial, según los análisis de *footprint* realizados (Andreu *et al.*, 2013), el 80% del flujo medido en la torre es aportado por el área dentro de los 1000 m de distancia en la dirección del viento predominante (SO) y, por tanto, inferior al tamaño de píxel de la aplicación del modelo (0,05°). Sin embargo, dada la continuidad y homogeneidad del sistema en varios kilómetros a la redonda de la zona experimental, las medidas pueden considerarse representativas de los procesos ocurridos en el píxel completo sobre el que se ha realizado la comparación.

2.2. Modelo de balance de energía y evapotranspiración relativa. Descripción y datos de entrada

Se ha empleado una versión revisada del modelo de balance de energía SEBS (*Surface Energy Balance System*) (Su, 2002). SEBS fue desarrollado para estimar los flujos convectivos usando los datos proporcionados por satélites de observación de la tierra. Incluye un modelo extendido para determinar la longitud de la rugosidad para la transferencia de calor, modificado por Chen *et al.* (2013), y la estimación de la fracción de evaporación apoyándose en la formulación del balance de energía en casos extremos.

El balance de energía en superficie se define (ecuación 1):

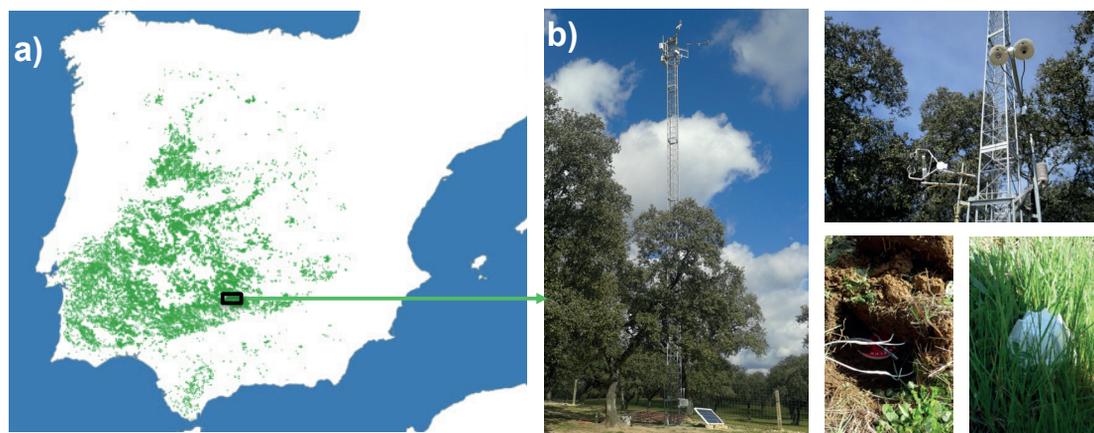


Figura 1. (a) Distribución del área de dehesa en la Península Ibérica y localización de la zona experimental usada en la validación; (b) Instrumentación de la torre de covarianza de torbellinos y algunos sensores complementarios.

$$R_n = G + H + \lambda E \tag{1} \quad \lambda E_{wet} = R_n - G - H_{wet} \tag{6}$$

donde R_n es la radiación neta, G es el flujo de calor al suelo, H es el flujo convectivo de calor sensible, y λE es el flujo convectivo de calor latente. La radiación neta se calcula mediante la ecuación 2:

$$H_{wet} = R_n - G - \lambda E_{wet} \tag{7}$$

$$R_n = (1 - \alpha)SW_d + \varepsilon LW_d - \varepsilon \sigma LST^4 \tag{2}$$

donde α es el albedo, SW_d es la radiación solar incidente, LW_d es la radiación de onda larga incidente, ε es la emisividad de la superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y LST es la temperatura de superficie. El flujo de calor al suelo se calcula en función de su ratio con la radiación neta (Γ) a partir de la ecuación 3:

$$G = R_n [\Gamma_c + (1 - f_c)(\Gamma_s - \Gamma_c)] \tag{3}$$

El ratio para una cubierta de vegetación (Γ_c) se asume igual a 0,05 (Monteith, 1973) y para suelo desnudo, $\Gamma_s = 0,315$, (Kustas y Daughtry, 1990).

Haciendo uso de estas ecuaciones y del balance de energía en situaciones secas y húmedas extremas, se puede simplificar su formulación de la siguiente manera (ecuaciones 4 y 5): (i) en el primer caso la evapotranspiración se considera igual a 0 y el calor sensible alcanza su valor máximo:

$$\lambda E_{dry} = R_n - G - H_{dry} = 0 \tag{4}$$

$$H_{dry} = R_n - G \tag{5}$$

(ii) en condiciones húmedas extremas la evapotranspiración tiene lugar a su tasa máxima, λE_{wet} limitada únicamente por la energía disponible para una superficie y condiciones atmosféricas dadas; y el calor sensible toma su valor mínimo, H_{wet} teniendo en cuenta las ecuaciones 6 y 7.

La evaporación relativa (Λ_r) es el cociente entre la evapotranspiración real y la potencial. Ha sido usada en trabajos previos como indicador del estrés hídrico en cultivos (Anderson et al., 2015, 2016), sequía (Anderson et al., 2011) y de la humedad relativa del suelo (Su et al., 2003), y es el mismo concepto en el que se basan los modelos que emplean coeficientes de cultivo para estimar las necesidades hídricas de los cultivos en la programación del riego (Allen et al., 1998). En este trabajo se usa como indicador del estado hídrico en la vegetación, y se calcula (ecuación 8):

$$\Lambda_r = \frac{\lambda E}{\lambda E_{wet}} = 1 - \frac{\lambda E_{wet} - \lambda E}{\lambda E_{wet}} \tag{8}$$

Sustituyendo las ecuaciones 1 a 5 en 6 y reorganizando, se obtiene en la ecuación 9:

$$\Lambda_r = 1 - \frac{H - H_{wet}}{H_{dry} - H_{wet}} \tag{9}$$

El calor sensible, H , es estimado aquí usando la hipótesis de similaridad y es limitado por los valores extremos seco y húmedo. H_{dry} es calculado usando la ecuación 5 y H_{wet} se deriva usando un conjunto de asunciones para condiciones de humedad extrema en la ecuación de Penman-Monteith (Menenti, 1984). Una descripción más detallada del modelo se puede consultar en Su (2002).

El modelo se ha aplicado sobre todo el territorio de la Península Ibérica a escala mensual y con una resolución espacial de 0,05°. Para ello, se han empleado los datos cuyas características y fuentes se detallan en la tabla 1. Fundamentalmente proceden de dos tipos de fuentes: (i) sensores de

Tabla 1. Bases de datos empleadas en el cálculo de flujos de energía en la Península Ibérica, período 2001-2015.

Variable	Fuente	Res. espacial	Res. temporal	Método
SW_d	ERA Interim	80 km	6 h	Reanálisis
LW_d	ERA Interim	80 km	6 h	Reanálisis
T_a	ERA Interim	80 km	6 h	Reanálisis
Q	ERA Interim	80 km	6 h	Reanálisis
u	ERA Interim	80 km	6 h	Reanálisis
P	ERA Interim	80 km	6 h	Reanálisis
LST	MOD11C3 V5	0,05°	1 mes	Satélite
Albedo	GlobAlbedo/MODIS	0,1°	1 mes	Satélite
NDVI	SPOT VEGETATION	0,01°	10 días	Satélite

observación de la tierra, en concreto MODIS y SPOT-VEGETATION, para las variables: albedo, temperatura superficial (LST), emisividad de la superficie e índice de área foliar (LAI), ambos derivados del NDVI; (ii) la base de datos de reanálisis atmosférico global ERA-Interim, producida por el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) de forma continua desde 1979 y en tiempo real. En este caso las variables han sido: presión (P) y temperatura del aire (T_a), humedad específica (Q), velocidad del viento (u), radiación incidente de onda corta (SW_d) y de onda larga (LW_d).

2.3. Cálculo de anomalías de evaporación y su impacto

La serie de evaporación relativa en cada punto se ha normalizado usando la desviación estándar de la serie, para identificar con mayor facilidad las anomalías ocurridas en la evaporación a escala mensual y anual. Esta normalización permite diferenciar eventos más secos que la media para el período de tiempo (año/mes) de referencia.

Este procedimiento de normalización requiere una distribución normal de los datos. En este caso, aun cuando la distribución de la ET es sesgada, la de la evaporación relativa se acerca más a la normalidad, presentando valores similares de media, moda y mediana.

Para evaluar el efecto de las anomalías de evaporación sobre la vegetación de dehesa se han seleccionado como indicadores de la cantidad de vegetación y su producción, la fracción de cobertura del suelo mensual y anual (%), y la producción de trigo de secano (kg/ha) (MAPAMA, 2017). El cereal de secano es el cultivo predominante en zonas de dehesa por lo que su rendimiento en un buen indicador del impacto del déficit de agua sobre uno de los componentes productivos de este sistema.

3. Resultados

3.1. Evaluación del funcionamiento del modelo en la zona experimental

Los flujos de energía observados en la zona experimental durante los años 2014 y 2015, y agregados mensualmente, se han empleado para validar los

resultados del modelo SEBS (Figura 2). La comparación presenta un error medio cuadrático (RMSE) para todos los flujos entre 14 y $29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, con una desviación media (MBE) entre -27 y $13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Se observa en la Figura 2 que los flujos radiativos estimados se ajustan mejor a los medidos que los convectivos, que presentan una mayor dispersión y muestran una sobreestimación del calor latente (MBE= $-27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), a la vez que se infraestima ligeramente el calor sensible (MBE= $17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). En ambas componentes las estimaciones presentan coeficientes de determinación $R^2 > 0,7$. Estos resultados son similares a los obtenidos en aplicaciones previas de este modelo en condiciones parecidas a las de este trabajo: escala mensual, datos de entrada procedentes de sensores remotos y reanálisis; pero en cubiertas predominantemente agrícolas (Chen *et al.*, 2014). Por otro lado, los resultados obtenidos para H y λE mejoran los presentados a escala global por Vinukollu *et al.* (2011) sobre este y otros ecosistemas, y el RMSE de λE es inferior al promedio, de $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, calculado por Kalma *et al.* (2008) compilando los resultados de 30 validaciones de estimaciones de λE publicadas usando diferentes métodos y tipos de cubierta.

La Figura 3 presenta la agregación a escala anual de los principales resultados obtenidos en la zona experimental en relación al consumo de agua, y cómo han evolucionado las variables implicadas a lo largo de los 14 años hidrológicos estudiados. La

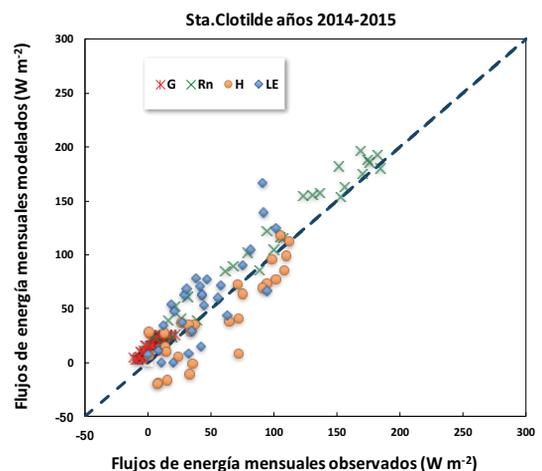


Figura 2. Comparación de flujos de energía mensuales observados en la zona experimental y estimados usando SEBS.

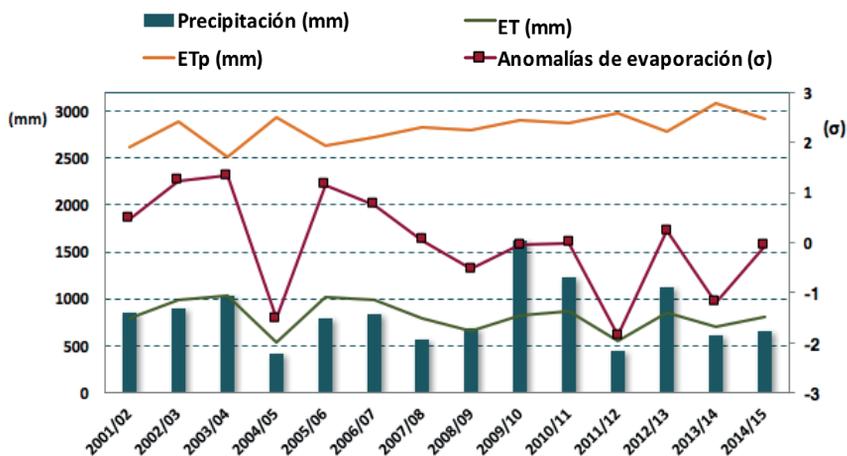


Figura 3. Evolución anual de la precipitación, evapotranspiración real y potencial y anomalías de evaporación en la zona experimental de Sta. Clotilde.

estrecha relación entre precipitación y ET muestra que, en la mayoría de los años, la vegetación consume toda el agua que recibe el sistema en forma de precipitación. Esta tendencia se rompe en los 3 años muy húmedos de la serie (2009/2010, 2010/2011 y 2012/2013), en los que se produjeron lluvias intensas en cortos períodos de tiempo que saturaron el suelo, favoreciendo la escorrentía e impidiendo su aprovechamiento por parte de la vegetación. Sin embargo, la tendencia general observada confirma el control que ejerce la dinámica de la humedad del suelo sobre el funcionamiento de este ecosistema, ya que las variaciones en transpiración están directamente relacionadas con el crecimiento y la producción de la vegetación. A la inversa, también destaca el significativo papel que ejerce la vegetación sobre el balance hídrico de este sistema. En algunos años, se aprecia claramente la relación de complementariedad entre la ET y la ET potencial descrita por Bouchet (1963), por ejemplo, en los períodos secos de 2004/2005, 2011/2012 y 2013/2014. Cuando la ET se ve limitada por el déficit de agua en el suelo, la energía disponible se reparte a favor del calor sensible frente al latente, aumentando H e incrementando el déficit de presión de vapor de la atmósfera, conduciendo a un aumento de la ET potencial.

La evolución de las anomalías de evaporación de la Figura 3 permite identificar los años en que esta zona ha experimentado déficits hídricos y su nivel de severidad. Por orden de intensidad decreciente, los años secos han sido: 2011/2012, 2004/2005,

2013/2014 y muy ligeramente 2008/2009. Los cuatro años coinciden con los identificados en toda la zona de dehesa de la Península, descrita en el siguiente apartado, aunque se aprecian diferencias significativas en el nivel de severidad con respecto a la media, como se analiza más adelante.

3.2. Evolución promedio anual (2001-2015) del estrés hídrico de la vegetación de dehesa

El análisis de las anomalías de evaporación y su impacto sobre la vegetación se ha abordado, en primer lugar, con el mayor nivel de agregación espacial y temporal posible, promediando las variables analizadas para toda la zona de dehesa de la Península (3,1 millones de ha) a escala anual. La Figura 4 permite identificar los años secos, su intensidad en relación al período de estudio y el impacto que estos déficits de agua han provocado tanto en la cantidad de vegetación como en su producción.

El análisis de las anomalías anuales indica que en el período estudiado no se ha producido ninguna sequía de larga duración (>1 año). Se identifican cuatro episodios de impacto dispar. El evento más intenso se produjo en el año 2004/2005, presenta la mayor anomalía negativa promedio de la serie (-1,5) y un impacto patente en la disminución de la fracción de cobertura y de la cosecha, -20% y -45%, respectivamente. En este período, el déficit

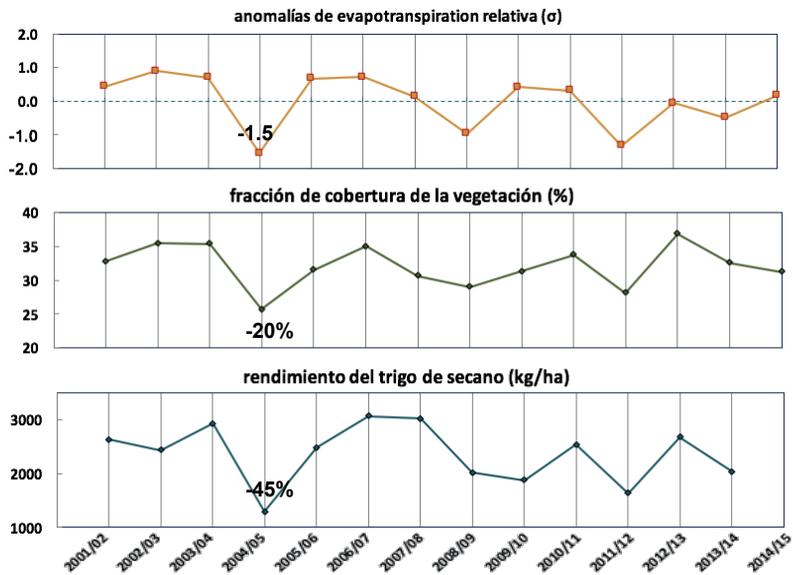


Figura 4. Evolución anual de las anomalías de evaporación, fracción de cobertura de la vegetación y producción del trigo de secano en las dehesas de la Península Ibérica.

de agua afectó a prácticamente toda la superficie de dehesa, lo que se aprecia en la predominancia de colores rojizos en el primer mapa de la Figura 5. Estos mapas representan la distribución espacial de las anomalías de evaporación en los tres principales años secos de la serie, 2004/2005, 2008/2009 y 2011/2012, y permiten apreciar la intensidad de las mismas en diferentes zonas del territorio. Se ha delimitado en color negro el área en la que la dehesa es el uso del suelo dominante. El segundo evento seco, ocurrido en 2008/2009, tuvo una distribución irregular y aunque fue bastante intenso en el centro y oeste de la zona de estudio (mapa intermedio, Figura 5), no afectó mucho a la zona situada más al este, por lo que el efecto que se aprecia en los promedios de cantidad de vegetación y producción es más moderado. En la zona menos afectada por el déficit de agua es donde se localiza el área experimental de Sta. Clotilde y, como se observa en la Figura 3, la precipitación ese año solo fue levemente inferior a la media y la anomalía de evaporación es solo ligeramente negativa. Sin embargo, en 2013/2014 sí se observa en esta zona una sequía de intensidad media que no se aprecia en los datos globales de la Figura 4, lo que es debido a la distribución espacial parcial de la misma, afectando únicamente a la zona este del área de dehesa.

3.3. Análisis mensual de los principales eventos de sequía y su impacto sobre la vegetación de dehesa

Para este análisis se han seleccionado los dos eventos de sequía más intensos de la serie: 2004/2005 y 2011/2012. La Figura 6 presenta la evolución mensual de ambos, incluyendo los años anterior y posterior, que permiten evaluar las condiciones iniciales y el impacto del déficit hídrico observado. El impacto sobre la vegetación se puede valorar atendiendo a la evolución mensual de su fracción de cobertura que, como se observa en ambas figuras, presenta una clara oscilación estacional típica de este ecosistema. Esta evolución presenta un pico máximo durante la primavera debido a la contribución del pasto, y un mínimo en verano, cuando el pasto está completamente seco y la fracción de cobertura del suelo refleja únicamente la aportación de los árboles. La dinámica de la vegetación permite analizar por separado el efecto de la escasez de agua sobre los dos principales estratos, herbáceo y arbóreo, del sistema. Como indican las líneas discontinuas de la Figura 6 se produce un impacto más pronunciado sobre la vegetación herbácea de raíces menos profundas y, por tanto, con menos capacidad de superar el déficit de agua en los horizontes más

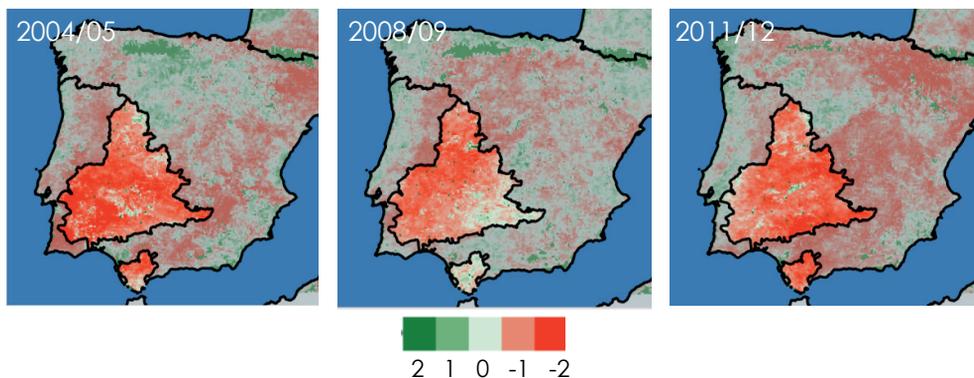


Figura 5. Distribución espacial de las anomalías de evaporación (σ) en los tres años más secos del período 2001-2015.

superficiales del suelo que son los primeros que se agotan. Las raíces de las encinas exploran un volumen de suelo muy superior, que puede alcanzar valores máximos alrededor de 30 m de extensión horizontal y 5 m de profundidad (Moreno *et al.*, 2005). Este desarrollado sistema radicular permite a las encinas enfrentar cada año el seco período estival Mediterráneo y, aunque durante los años secos su actividad se reduce y baja la cobertura arbórea (Figura 4), ésta se recupera generalmente al año siguiente. Los datos promedio indican que ninguno de los eventos analizados parece haber producido daños permanentes sobre estos estratos

de vegetación, aunque un análisis más pormenorizado en zonas concretas de mayor afectación es necesario para respaldar este resultado.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha validado la aplicación del modelo de balance de energía SEBS en un sistema de dehesa, proporcionando estimaciones suficientemente precisas ($RMSD < 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) para realizar un seguimiento de la ET y el estrés hídrico de la vegetación en las condiciones estudiadas. Las anomalías anuales de evapotranspiración relativa,

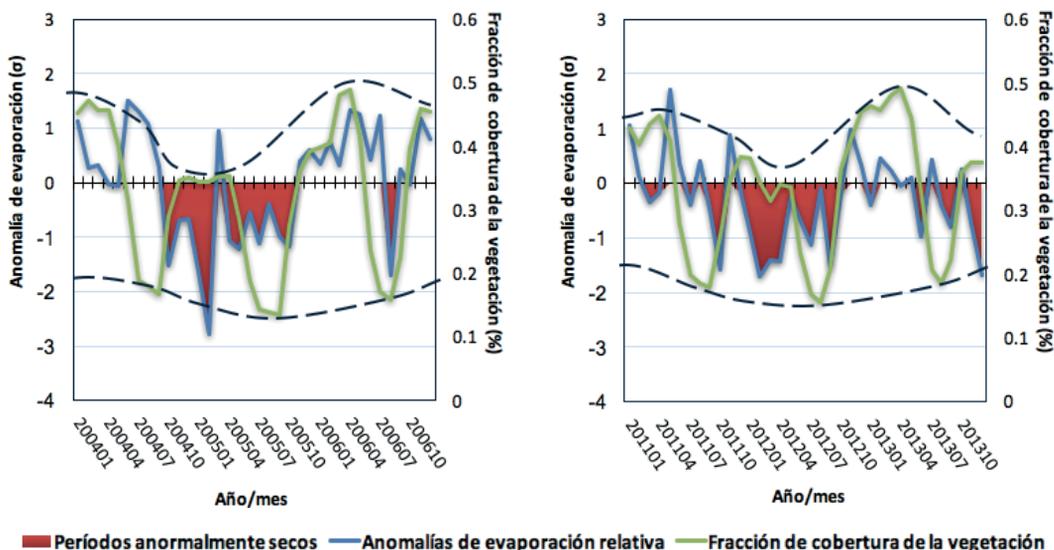


Figura 6. Evolución mensual de las anomalías de evaporación y fracción de cobertura (f_c) de la vegetación durante los dos principales eventos de sequía observados en la serie estudiada. Las líneas discontinuas resaltan las variaciones en f_c máxima y mínima anual.

derivadas del mismo, han permitido identificar y caracterizar los principales años secos ocurridos durante el período de estudio (2001-2015) en las zonas de dehesa de la Península Ibérica, así como su distribución espacial y el efecto que cada evento ha tenido sobre la vegetación y su producción. Las distribuciones mensuales, tanto de las anomalías como de la fracción de cobertura de la vegetación, han aportado información más detallada sobre la evolución de los principales eventos identificados. La diferente dinámica estacional de los estratos de vegetación, árboles y pasto, ha permitido caracterizar por separado la respuesta de cada uno de ellos ante las situaciones concretas de escasez de agua ocurridas en los años analizados.

Este primer análisis, promediado para toda la zona de dehesa de la Península, ha permitido obtener información general de interés sobre los principales episodios de sequía ocurridos en el período estudiado. Sin embargo, un análisis más pormenorizado de la base de datos generada, identificando áreas donde se hayan dado situaciones más extremas y comparando los procesos ocurridos en zonas de características distintas y sus impactos, permitirá mejorar nuestro conocimiento sobre el uso que hace del agua la vegetación de la dehesa, y el efecto del estrés hídrico en este ecosistema. Esto, a su vez, mejorará nuestra capacidad de diseñar medidas de protección más eficaces frente a futuras situaciones de escasez de recursos hídricos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la financiación recibida de INIA y FEDER 2014-2020 (Programa operativo de crecimiento inteligente) mediante el proyecto RTA2014-00063-C04-02, y del *Co-operative Research Programme (CRP): Biological Resource Management for Sustainable Agricultural Systems* de la OECD.

Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Roma, Italia: FAO.

Anderson, M. C., Hain, C., Wardlaw, B., Pimstein, A., Mecikalski, J.R., Kustas, W.P. 2011. Evaluation of Drought Indices Based on Thermal Remote Sensing of Evapotranspiration over the Continental United States. *Journal of Climate*, 24, 2025-2044. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3812.1>

Anderson, M.C., Zolin, C.A., Hain, C.R., Semmens, K., Yilmaz, M.T., Gao, F. 2015. Comparison of satellite-derived LAI and precipitation anomalies over Brazil with a thermal infrared-based Evaporative Stress Index for 2003-2013. *Journal of Hydrology*, 526, 287-302. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.005>

Anderson, M.C., Zolin, C.A., Sentelhas, P.C., Hain, C.R., Semmens, K., Yilmaz, M.T., Gao, F., Otkin, J. A., Tetrault, R. 2016. The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. *Remote Sensing of Environment*, 174, 82-99. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.034>

Andreu, A., González-Dugo, M.P., Kustas, W.P., Polo, M.J. and Anderson, M.C. 2013. Modelling surface energy fluxes over a *dehesa* ecosystem using a two-source energy balance model and medium resolution satellite data. In: *Proceedings Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV*, 8887, Dresden, Alemania. <https://doi.org/10.1117/12.2029235>

Andreu, A., Timmermans, W. J., Skokovic, D., González-Dugo, M. P. 2015. Influence of component temperature derivation from dual angle thermal infrared observations on TSEB flux estimates over an irrigated vineyard. *Acta Geophysica*, 63(6), 1540-1570. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0037>

Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., van der Wal, T. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*, 212, 213-229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)

Bouchet, R.J. 1963. Évapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. In: *Proc. International Association Scientific Hydrology Symp.*, Publ. No. 62, Berkeley, EEUU. pp.134-142.

Chen, X., Su, Z., Ma, Y., Yang, K., Wen, J., Zhang, Y. 2013. An improvement of roughness height parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Tibetan Plateau. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 52, 607-622. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-056.1>

- Chen, X., Su, Z., Ma, Y., Liu, S., Yu, Q., Xu, Z. 2014. Development of a 10 year (2001–2010) 0.1° dataset of land-surface energy balance for mainland China. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 14, 14471-14518. <https://doi.org/10.5194/acpd-14-14471-2014>
- Corcobado T., Solla A., Madeira M.A., Moreno G. 2013. Combined effects of properties and *Phytophthora cinnamomi* infections on *Quercus ilex* decline. *Plant Soil*, 373, 403–413. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1804-z>
- Gonzalez-Dugo, M.P., Neale, C.M.U., Mateos, L., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Anderson, M.C., Li, F. 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1843-1853. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.012>
- Kalma, J., McVicar, T., McCabe, M. 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surv. Geophys.*, 29, 421-469. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9037-z>
- Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., Soussana, J.-F. 2014. Europe. 2014. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, y L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, USA, pp. 1267-1326.
- Kustas W.P., Daughtry C.S.T. 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49, 205-223. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90033-3)
- Kustas, W.P., Norman, J.M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Science* 41, 495-516. <https://doi.org/10.1080/02626669609491522>
- MAPAMA, 2017. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España. <http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrc/> (último acceso: noviembre 2017).
- Menenti, M. 1984. *Physical aspects of and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques*. Report 10 (special issue), Institute for Land and Water Management Research (ICW), Países Bajos, 202pp.
- Monteith J.L. 1973. *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold Press.
- Moreno, G., Obrador, J.J., Cubera, E., Dupraz, C. 2005. Fine root distribution in *dehesas* of central-western Spain. *Plant Soil*, 277, 153-162. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-6805-0>
- Moreno, G., Pulido, F.J., 2009. The functioning, management and persistence of *dehesas*. In: *Agroforestry in Europe: current status and future prospects*, pp. 127-160. Berlin, Alemania: Springer Science.
- Norman, J. M., Kustas, W. P., Humes, K. S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations directional radiometric surface temperature. *Agricultural Forest Meteorology*. 77, 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Plieninger T., Wilbrand C. 2001. Land use, biodiversity conservation, and rural development in the *dehesas* of Cuatro Lugares, Spain. *Agroforest Syst.*, 51, 23-34. <https://doi.org/10.1023/A:1006462104555>
- Rodríguez-Iturbe, I., Porporato A., Laio F., Ridolfi L. 2001. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress. I. Scope and general outline. *Advances in Water Resources*, 24, 695-705. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00004-5)
- Su, Z., 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6, 85-100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Su Z., Yacob A., Wen J., Roerink G., He Y., Gao B., Boogaard H. and van Diepen C., 2003. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory and experimental validation. *Physics Chemistry of the Earth*, 28(1-3), 89-101. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00010-X)
- Vinukollu, R. K., Wood, E. F., Ferguson, C. R., Fisher, J. B., 2011. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches. *Remote Sens. Environ.*, 115, 801-823. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.006>