

## El consumo del agua por el cultivo de olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea

PETER S. SEARLES<sup>✉</sup>, MARTÍN AGÜERO ALCARÁS & MARÍA C. ROUSSEAU

CRILAR-CONICET. Anillaco, La Rioja, Argentina.

**RESUMEN.** Durante los últimos 20 años ha habido una gran expansión en la superficie plantada con olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina (NOA). Sin embargo, la mayoría de la información utilizada en la región para la toma de decisiones de manejo acerca del consumo de agua por el cultivo proviene de la Cuenca Mediterránea. Esta revisión discute: 1) las diferencias en el clima entre la Cuenca Mediterránea y la zona olivícola del NOA, 2) el consumo de agua por el olivo en el Mediterráneo y sus respuestas ecofisiológicas al estrés hídrico, y 3) resultados experimentales en el NOA utilizando a la localidad de Aimogasta (La Rioja) como un caso de estudio. La información meteorológica indica que la temperatura del aire (principalmente en el invierno y primavera) y la evapotranspiración potencial anual (ET<sub>o</sub>) son mayores en el NOA que en el Mediterráneo, mientras que la precipitación es menor. Estas diferencias en temperatura resultan en: una escasez de horas de frío para la floración en algunas variedades, adelantos en las etapas fenológicas y cambios en la calidad y cantidad del aceite en el NOA en relación con el Mediterráneo. Resultados experimentales del Mediterráneo muestran que la transpiración y el rendimiento, entre otros, responden fuertemente al riego a pesar de que el olivo es una especie con una alta tolerancia al estrés hídrico en comparación a otros frutales. En forma similar al Mediterráneo, el consumo de agua por el olivo en Aimogasta fue estimado como 70-75% de ET<sub>o</sub> bajo condiciones de riego óptimo y el consumo de agua es 1100-1200 mm/año en el NOA y 900-1000 en el Mediterráneo. Además, el riego requerido en el NOA es más que el doble por la falta de precipitación en muchas zonas. Un resultado no anticipado en Aimogasta, basado sobre los estudios del Mediterráneo, fue el excesivo crecimiento vegetativo bajo condiciones de alto riego. El excesivo vigor observado podría ser explicado potencialmente como una respuesta al riego en interacción con las altas temperaturas de la primavera que ocurren en la región. El desarrollo de estrategias de riego deficitario controlado en la primavera (u otros momentos) podría permitir un ahorro de agua y una mejora de la relación entre crecimiento vegetativo y reproductivo.

[Palabras clave: evapotranspiración potencial, conductancia foliar, evaporación del suelo, flujo de savia, riego deficitario, transpiración]

**ABSTRACT. Water use by olive orchards (*Olea europaea* L.) in the Northwest of Argentina: a comparison with the Mediterranean Basin:** In the last 20 years, there has been a great expansion in the land area planted with olive trees (*Olea europaea* L.) in the Northwest of Argentina (NWA). Nevertheless, most of the information utilized in management decisions in the region concerning crop water use comes from the Mediterranean Basin. This review discusses: 1) differences in climate between the Mediterranean Basin and the olive production areas in the NWA, 2) water use by olive in the Mediterranean and ecophysiological responses to water stress, and 3) experimental results from the NWA using Aimogasta (La Rioja) as a case study. Meteorological data indicate that the air temperature (primarily in the winter and spring) and the annual potential evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) are higher in the NWA than in the Mediterranean, while precipitation is less. Differences in

✉ CRILAR-CONICET. Entre Ríos y Mendoza s/n,  
(5301) Anillaco, La Rioja, Argentina.  
psearles@crilar-conicet.com.ar

Recibido: 10 de septiembre de 2010; Fin de arbitraje: 20 de diciembre de 2010; Revisión recibida: 14 de enero de 2011; Aceptado: 20 de enero de 2011

temperature have been shown to result in lack of chilling hours for flowering in some varieties, advances in phenological stages, and changes in oil quality and quantity in NWA relative to the Mediterranean. Experimental results from the Mediterranean show that transpiration, yield, and other variables respond strongly to irrigation although olive is a species with a high tolerance to water stress in comparison to other fruit trees. Similar to the Mediterranean, olive water use in Aimogasta was estimated to be 70-75% of ETo under optimally irrigated conditions. Considering the differences in the ETo values in the two regions, water use is 1100-1200 mm/year in the NWA and 900-1000 in the Mediterranean. Additionally, the required irrigation is more than double due to the lack of precipitation in many areas. An unanticipated result in Aimogasta based on the studies from the Mediterranean was the excessive vegetative growth under high irrigation conditions. The excessive vigour was potentially a response to the irrigation in interaction with the high spring temperatures that occur in the region. The development of regulated deficit irrigation strategies in the spring (or in other time periods) could save water and improve the ratio of vegetative to reproductive growth.

[Keywords: potential evapotranspiration, leaf conductance, soil evaporation, sap flow, deficit irrigation, transpiration]

## INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1950, la superficie agrícola mundial bajo riego ha aumentado de 100 a 250 millones de hectáreas, por lo cual la agricultura se ha transformado en la actividad que más agua dulce demanda (>70%) (Garces-Restrepo et al. 2007). En gran parte, esta expansión fue posible debido a avances tecnológicos (e.g., riego por goteo) que permitieron cultivos en zonas más áridas. En Argentina, la superficie regada ha aumentado más que 60% en los últimos 40 años (FAO 2010), y en la actualidad se riegan áreas donde el uso de agua por la agricultura fue tradicionalmente mínimo, o muy bajo. Es de prever que la competencia por el agua con otras actividades podría aumentar regionalmente en el futuro (Gleick 2003; Fereres 2008).

Considerando el impacto potencial de la agricultura sobre la hidrología de una región, la comprensión del funcionamiento de los cultivos plantados en distintas zonas resulta central. En términos generales, el uso de agua por un cultivo incluye principalmente la transpiración a través de los estomas de las plantas y la evaporación de agua directamente desde el suelo. En la actualidad, los agrometeorólogos utilizan modelos complejos como la ecuación de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración potencial (ETo) del sistema, y esta información es transferida a

los productores para programar el riego (Allen et al. 1998). Otros factores como el drenaje profundo también contribuyen al uso de agua por el cultivo, pero los cálculos precisos del balance de agua (i.e., "inputs-outputs" totales) son poco frecuentes.

Cuando se aplicaron las leyes de diferimiento impositivo en el noroeste de Argentina (provincias de La Rioja, Catamarca y San Juan) en la década del '90, la superficie agrícola bajo riego aumentó de forma marcada. En estas nuevas áreas agrícolas, la mayor proporción de la superficie fue plantada con olivo, que pasó de 30 a más de 90000 ha (SAGPyA 2008). En la actualidad, las plantaciones de olivo representan cerca de 70% de la superficie agrícola de las provincias de Catamarca y La Rioja (Tabla 1). Esta expansión resultó en el desmonte de ecosistemas naturales dominados por especies leñosas como jarilla (*Larrea* spp.), retamo (*Bulnesia retamo*), algarrobo (*Prosopis* spp.), brea (*Cercidium australe*) y otras. Aunque el terreno desmontado representó menos de 1% del territorio total de estas provincias, las fincas de olivo hoy en día consumen cerca de siete veces más agua que la población humana en las provincias de Catamarca y La Rioja, y alrededor de tres a cuatro veces más en San Juan (Tabla 1). Bajo condiciones óptimas de riego, el olivo puede consumir más de 50000 L/ha diarios durante el verano, y cada árbol puede transpirar más de 100 L/día. En las provincias de Catamarca y La Rioja, donde

**Tabla 1.** Comparación del consumo anual de agua doméstico con el de las fincas de olivo en las provincias de Catamarca, La Rioja y San Juan. Los datos de la población humana (#) son estimaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos al año 2010. Los varios cálculos están basados en un consumo de agua de 250 L.habitante<sup>-1</sup>.día<sup>-1</sup>, un riego anual de 10000 m<sup>3</sup>/ha, y una densidad de plantación de 250 árboles/ha.

**Table 1.** Comparison of annual domestic water use with that of olive orchards in the provinces of Catamarca, La Rioja, and San Juan. The human population numbers are estimates from the Instituto Nacional de Estadística y Censos for 2010. The various calculations are based on a daily water use of 250 L.person<sup>-1</sup>.day<sup>-1</sup>, an annual irrigation of 10000 m<sup>3</sup>/ha, and an orchard density of 250 trees/ha.

Variable	Catamarca	La Rioja	San Juan
Superficie provincial (km <sup>2</sup> )	102602	89680	89651
Superficie total cultivada (ha)	34000	31000	80164
Superficie de olivo (ha)	24500	20500	19500
Población humana (#)	388416	341207	605378
Número de olivos (#)	6125000	5125000	4875000
Consumo de agua domestico (m <sup>3</sup> /año)	35442960	31135139	55240743
Consumo de agua por olivo (m <sup>3</sup> /año)	245000000	205000000	195000000

la industria olivícola utiliza una cantidad de agua considerable para el procesamiento de aceitunas de mesa, es probable que las actividades (i.e., campo+fábrica) del sector olivícola representen 80-90% del uso del agua provincial.

Aunque la utilización de agua por el sector olivícola es alto, las consecuencias de este uso dependen en gran parte en el agua disponible. En San Juan, el agua superficial de los ríos que proviene del deshielo de las montañas representa una fuente de agua importante, pero en Catamarca y La Rioja el agua proviene casi de forma exclusiva de los acuíferos subterráneos, con excepción de algunas fincas pequeñas cercanas a las montañas. En general, el agua es bombeada desde una profundidad de 80-200 m bajo la superficie, y este uso de energía eléctrica compite con el de las zonas urbanas, y causa escasez durante los meses del verano. Si se considera que el promedio anual de lluvia en esta región es bajo (80-400 mm/año) y que el riego anual en una finca madura es de más de 1000 mm, en algunas áreas el consumo de agua podría ser mayor que la recarga anual de los acuíferos.

En este sentido, parece beneficioso evaluar con más detalle el consumo de agua por el cultivo de olivo en el noroeste de Argentina, y determinar en qué medida podría reducirse.

Aunque existen revisiones de la literatura sobre varios aspectos del uso de agua, de la fisiología y del rendimiento de olivo (e.g., Fernández & Moreno 1999; Connor & Fereres 2005), la mayoría de la información proviene de España, Italia, Grecia y otros países de la Cuenca Mediterránea. En comparación, la respuesta del cultivo en zonas de producción más nuevas (e.g., Australia y Argentina) ha sido hasta ahora pobremente evaluada (Connor 2005). Esta revisión discute: 1) las diferencias del clima entre la Cuenca Mediterránea y la zona olivícola en el noroeste de Argentina, 2) el consumo de agua por el olivo en el Mediterráneo y sus respuestas ecofisiológicas al estrés hídrico, y 3) los resultados experimentales realizados en la localidad de Aimogasta (La Rioja) como un caso de estudio.

## DIFERENCIAS CLIMÁTICAS ENTRE LA CUENCA MEDITERRÁNEA Y EL NOROESTE DE ARGENTINA

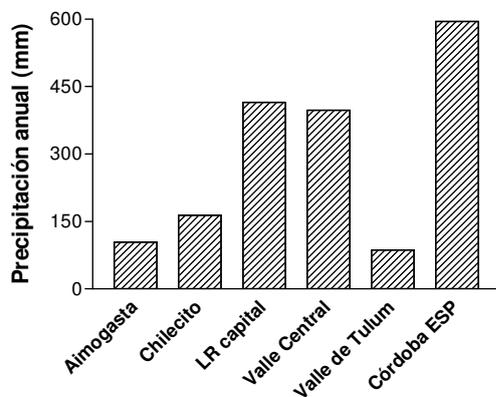
El clima en Catamarca, La Rioja y San Juan difiere bastante del clima de la Cuenca Mediterránea, donde se cultiva el olivo desde hace mucho tiempo (Rana & Katerji 2000; Ayerza & Sibbet 2001). Por ejemplo, la

precipitación anual es menor en la mayoría de las zonas de producción en el noroeste de Argentina (NOA) que en el Mediterráneo (Figura 1). Además, la precipitación cae principalmente en el verano como lluvias torrenciales, mientras la lluvia en el Mediterráneo ocurre en el invierno, con lluvias más frecuentes y menos intensas. Esta falta de lluvia durante el invierno en la región olivícola argentina deriva en la necesidad de regar en esta época en adición al resto del año para

evitar estrés hídrico en el cultivo (Rousseaux et al. 2008).

El régimen de temperatura del aire a lo largo del año también es distinto en el NOA y el Mediterráneo (Figura 2A). Las temperaturas del invierno y la primavera son mayores en el NOA que en el Mediterráneo. Como consecuencia, el número de horas de frío acumuladas en el invierno, necesarias para romper la dormición de las yemas reproductivas (De Melo-Abreu et al. 2004), es bajo, y algunas variedades europeas no florecen o sólo florecen en algunos años (Aybar 2010). Para las variedades que florecen sin complicaciones, las temperaturas altas en la primavera resultan en una fenología más adelantada que en el Mediterráneo, incluyendo el momento de floración, fecha de esclerificación del endocarpo, inicio de la síntesis de aceite y días desde floración hasta cosecha. Aunque las temperaturas son parecidas en el verano, la síntesis de aceite sucede en momentos diferentes en ambas regiones. Debido al adelanto de la fenología en el NOA, la síntesis tiene lugar principalmente en el verano, cuando las temperaturas son muy altas, mientras que en el Mediterráneo la síntesis ocurre más tarde, en el otoño, cuando las temperaturas son moderadas. Potencialmente, cambios en la calidad de aceite en el NOA como el bajo contenido de ácido oleico (un ácido graso con propiedades favorables para la salud humana y un indicador utilizado en el comercio para determinar la calidad del aceite) son relacionados a éste fenómeno (Mannina et al. 2001; Rondanini et al. 2007; Ceci & Carelli 2010). Además, resultados preliminares sugieren que las temperaturas altas reducen la cantidad de aceite (García-Inza, comunicación personal).

Los datos de temperatura de la Figura 2A son representativos del NOA y la Cuenca Mediterránea, aunque la figura sólo muestra las temperaturas de Aimogasta (La Rioja, Argentina) y Córdoba (España). Las diferencias en las temperaturas del invierno y primavera entre el NOA y regiones con clima mediterráneo como California (EE.UU) y España contribuyen a una ETO

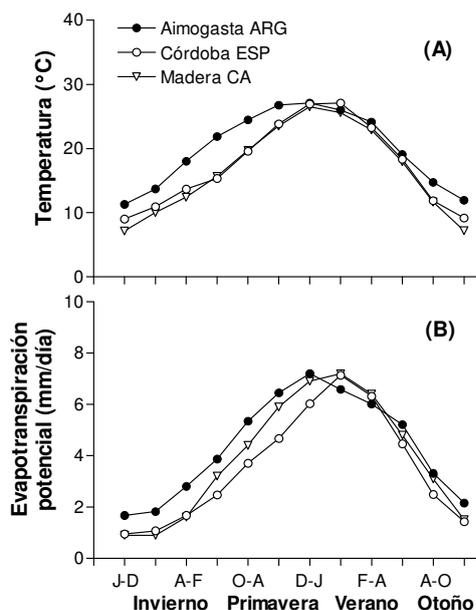


**Figura 1.** Precipitación anual en cinco zonas de producción de olivo en las provincias de Catamarca, La Rioja y San Juan en comparación a Córdoba, España. Aimogasta (La Rioja; 28.5° S, 66.8° O); Chilecito (La Rioja; 29.1° S; 67.3° O); LR capital (La Rioja; 29.2° S, 66.5° O); Valle Central (Catamarca 28.4° S, 65.5° O); Valle de Tulum (San Juan; 31.3° S, 68.3° O); Córdoba, España (37.9° S, 4.8° O). Los datos de Argentina son del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (1991-2006) con la excepción de Aimogasta (1994 - 2004) donde los valores provienen de estaciones meteorológicas ubicadas en fincas comerciales. El dato de Córdoba, España es de Orgaz & Fereres (2008).

**Figure 1.** Annual precipitation in five olive growing areas in the provinces of Catamarca, La Rioja, and San Juan in comparison to Córdoba, España. Aimogasta (La Rioja; 28.5° S, 66.8° O); Chilecito (La Rioja; 29.1° S; 67.3° O); LR capital (La Rioja; 29.2° S, 66.5° O); Valle Central (Catamarca 28.4° S, 65.5° O); Valle de Tulum (San Juan; 31.3° S, 68.3° O); Córdoba, España (37.9° S, 4.8° O). Data from Argentina are from the Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (1991-2006) with the exception of Aimogasta (1994-2004) where the values are from meteorological stations located on commercial farms. The value from Córdoba, España is from Orgaz & Fereres (2008).

mayor en el NOA (Figura 2B). La ETo anual en la región olivícola del NOA es cercana a 1600 mm cuando está calculada como evapotranspiración de referencia sobre césped utilizando las recomendaciones de FAO (Allen et al. 1998). En cambio, regiones con climas mediterráneos tienen valores anuales de 1300-

1400 mm (Beede & Goldhamer 2005; Villalobos et al. 2006; Orgaz & Fereres 2008). Con respecto al consumo de agua, la combinación de menos ETo en zonas mediterráneas y el hecho de que la lluvia ocurra principalmente en el invierno (300-700 mm), cuando la evaporación desde el suelo es baja, resulta en demanda y necesidades de riego menores en el Mediterráneo. El consumo promedio de agua en el Mediterráneo, en una finca comercial con buen rendimiento (10000 kg de frutos/año), es cercano a 400-500 mm de agua de lluvia y 400-500 mm de agua por riego. En Argentina, el consumo promedio podría ser alrededor de 250 mm de agua de lluvia más 800-1000 mm de agua por riego.



**Figura 2.** Temperatura media mensual (A) y promedio mensual de la evapotranspiración potencial diaria (B) en Aimogasta, Argentina (28.5° S, 66.8° O), Córdoba, España (37.9° N, 4.8° O) y Madera, California (37.0° N, 120.1° O). Los datos son de Correa-Tedesco et al. (2010), Villalobos et al. (2006) y Orgaz & Fereres (2008), y el "California Irrigation Management Information System" ([www.cimis.water.ca.gov](http://www.cimis.water.ca.gov)), respectivamente. Ellos cubren periodos de tiempo distintos y son disponibles en las publicaciones individuales. Los meses del Hemisferio Sur y Norte están separados por guiones en el eje x.

**Figure 2.** Monthly median temperature (A) and the monthly average of daily potential evapotranspiration in Aimogasta, Argentina (28.5° S, 66.8° O), Córdoba, España (37.9° N, 4.8° O), and Madera, California (37.0° N, 120.1° O). Data are from Correa-Tedesco et al. (2010), Villalobos et al. (2006) and Orgaz & Fereres (2008), and the California Irrigation Management Information System ([www.cimis.water.ca.gov](http://www.cimis.water.ca.gov)), respectively. The data cover different time periods and are available in the individual publications. The months for the Southern and Northern Hemispheres are separated by dashes on the x-axis.

## CONSUMO DE AGUA EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS Y RESPUESTAS AL ESTRÉS HÍDRICO

En comparación con otros frutales como el manzano o el durazno, el olivo tiene una gran capacidad de demorar en el tiempo el inicio del estrés hídrico bajo condiciones de poca precipitación o riego (evasión) y de mantener actividad metabólica durante un período de estrés hídrico (tolerancia) (Connor 2005). Esta capacidad proviene tanto de características morfológicas (e.g., hojas pequeñas con alta reflectancia de radiación solar) como fisiológicas (e.g., baja conductancia estomática). Por eso, el olivo es una especie que puede sobrevivir y fructificar durante los veranos secos del Mediterráneo.

### *Determinaciones del consumo de agua*

Una metodología clásica para estimar el consumo de agua en olivo evalúa el rendimiento de frutos o de aceite a lo largo de varios años bajo un número de tratamientos de riego (más de cinco, de ser posible) que representan un rango amplio de agua aplicada. El supuesto de esta metodología se basa en que el nivel de agua aplicada por año que resulta en el máximo rendimiento es casi igual a las

necesidades hídricas del cultivo (i.e., 100% de evapotranspiración del cultivo; 100% ETc). Con un conocimiento de la evapotranspiración potencial (i.e., la demanda atmosférica; ETo) y de los mm de agua consumidos bajo la situación de 100% ETc, puede determinarse un coeficiente del consumo de agua por el cultivo (Kc) para una región. Este Kc permite la programación de riego sobre una base diaria o semanal en una finca utilizando la fórmula desarrollada por FAO (Allen et al. 1998):

$$100\% \text{ ETc} = \text{ETo} * \text{Kc}$$

donde el riego recomendado es igual al 100% ETc. Por lo general, para fincas jóvenes se incluye un coeficiente de reducción (Kr) en función de la cobertura de árboles (%) para estimar el riego en comparación al que recibiría un cultivo maduro (Feres & Castel 1981).

Goldhamer et al. (1993) encontraron que el rendimiento de aceitunas de la variedad "Manzanillo" en California aumentó de 5000 a 16000 kg/ha al incrementar el riego de 225 a 1000 mm/año, y no aumentó con más agua aplicada. En otras palabras, el 100% de ETc fue alcanzado con aproximadamente 1000 mm. El rango amplio de rendimientos observado fue una función de la reducción del número de frutos, asociada a un menor número de yemas reproductivas que acompañó la reducción en el crecimiento de ramas en los niveles de riego

más bajo, donde el potencial agua foliar fue subóptimo (Metheney et al. 1994). En forma similar, el rendimiento de aceite aumentó de 100 kg/ha con 100 mm de riego a más que 600 kg/ha con 600 mm de riego en árboles inmaduros de la variedad "Arbequina" (Grattan et al. 2006). En fincas maduras de la variedad "Picual" en España, Moriana et al. (2003) encontraron que la respuesta del rendimiento de olivo al riego fue curvilínea, y que se saturaba a 700-900 mm de agua (i.e., 100% ETc). En conjunto, los resultados de varios estudios indican que el olivo tiene la capacidad de responder de manera favorable al riego, más allá de su alta tolerancia al estrés hídrico.

Además de la metodología clásica, el consumo de agua en olivo ha sido evaluado en una forma más "fisiológica". Varios autores en el Mediterráneo han usado medidas de flujo de savia en el tronco para determinar la transpiración (T) diaria del árbol entero, aunque las comparaciones entre estudios pueden ser difíciles por diferencias en unidades (e.g., T por área basal del tronco vs. T por área foliar del canopy), en condiciones ambientales como ETo diaria y en la variedad utilizada (Tabla 2). Mediciones de flujo de savia en combinación con microlisímetros que estiman evaporación del suelo (Es) en zonas del suelo mojadas y secas tienen el potencial de estimar ETc (T+Es). Con microlisímetros, Bonachela et al. (2001) estimaron que casi 20%

**Tabla 2.** Transpiración de árboles enteros de olivo bien regados en la Cuenca Mediterránea estimada a partir de datos de flujo de savia del tronco. Los valores de evapotranspiración potencial (ETo) son los promedios de los períodos medidos en cada estudio. Las unidades de transpiración son litros de agua por cm<sup>2</sup> de área basal del tronco por día o litros de agua por m<sup>2</sup> de área foliar por día.

**Table 2.** Whole-tree transpiration of well-watered olive trees in the Mediterranean Basin estimated from trunk sap flow. The values of potential evapotranspiration (ETo) are averages of the measured periods in each study. The units of transpiration are liters of water per cm<sup>2</sup> of trunk basal area per day or liters of water per m<sup>2</sup> of leaf area per day.

Lugar	Varietal	ETo (mm.día <sup>-1</sup> )	Transpiración	Fuente
Benevento, Italy	Kalamata	1.5	0.1-0.3 L.cm <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Tognetti et al. 2004
Benevento, Italy	Nocellara del Belice	5.2	0.5-1.6 L.cm <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Tognetti et al. 2009
Sevilla, España	Manzanilla	5.2	0.7-2.2 L.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Fernández et al. 2006
Sevilla, España	Manzanilla	6.2	0.7-1.7 L.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Fernández et al. 2008
Safara, Portugal	Cordovil	4.8	1.6-3.7 L.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Ramos & Santos 2010

del uso de agua en fincas maduras de olivo es de Es cuando el riego es por goteo, una práctica común en fincas modernas.

En tercer lugar, ETc puede ser medida en el campo con el sistema agrometeorológico de correlación de vórtices (“eddy covariance”) (Villalobos et al. 2000; Testi et al. 2004; Williams et al. 2004). Testi et al. (2004) usaron esta metodología para determinar ETc diaria a lo largo de tres años en una finca joven de la variedad “Arbequina”, y encontraron que ETc se duplicó cuando la cobertura de la superficie por el cultivo aumentó de 5% el primer año a 25% el tercer año. Williams et al. (2004) calcularon la ETc utilizando correlación de vórtices en una finca madura de olivo en Marrakech, Marruecos, y estimaron las fracciones de Es y T sobre la base de la concentración isotópica del vapor de agua a diferentes alturas adentro de la finca. T representó casi 75% del consumo de agua y Es 25% en los días subsiguientes a un riego por inundación.

Por último, también se puede estimar el consumo de agua en fincas de olivo a través de modelos de simulación. Testi et al. (2006) propusieron un modelo de ETc diaria con cálculos de T, evaporación de lluvia interceptada por los canopeos de los árboles y Es. La transpiración en este modelo se determina usando el submodelo de conductancia del canopeo de Orgaz et al. (2007) que utiliza los promedios de la temperatura y del déficit de presión de vapor diarios y la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el canopeo como variables de entrada en combinación con la fórmula de McNaughton & Jarvis (1983). La fracción de radiación interceptada es una función de la densidad de los árboles en la finca, del volumen de los canopeos por unidad de superficie y de la densidad de área foliar (i.e., m<sup>2</sup> de área foliar/m<sup>3</sup> de canopeo). Otros autores han propuesto modelos similares de transpiración de olivo (Fernández et al. 2008; Yunusa et al. 2008). La evaporación de la lluvia interceptada por el canopeo es importante en lugares con un clima mediterráneo como España, donde la frecuencia de lluvia es considerable, y tiene menos importancia en

zonas más desérticas. El submodelo de suelo determina la proporción de la superficie de suelo mojada y seca, y estima Es con una ecuación de FAO-Penman modificado para la primera fase de evaporación y la metodología de Ritchie (1972) para la segunda fase de Es, en la que está limitada por la conductividad hidráulica del suelo y su contenido hídrico. Estimaciones de la ETc predicha por el modelo de simulación mostraron un buen ajuste con medidas de ETc por correlación de vórtices a lo largo de tres años. Usando bases de datos meteorológicos de 20 años, la ETc de una finca con 300 árboles/ha fue estimada en 1025 mm/año en Córdoba, España, y como 927 mm/año en Fresno, California (Testi et al. 2006).

#### *Respuestas ecofisiológicas al estrés hídrico*

Como ya fuera mencionado, el olivo es una especie con mucha tolerancia a condiciones de sequía. Inclusive, el estrés hídrico es utilizado como una herramienta de manejo del cultivo. Por ejemplo, el riego deficitario sostenido (RDS) es una estrategia en la que el cultivo es regado con menos del 100% de ETc durante la mayoría del año aunque es probable que el rendimiento sea reducido por disminuciones en el potencial agua y en la fotosíntesis (Goldhamer et al. 1993; Girona et al. 2002). Sin embargo, esta estrategia puede ser beneficiosa en zonas donde el agua es muy limitante porque la misma cantidad de agua puede ser utilizada sobre más superficie con el objetivo de obtener mayor producción por mm de agua aplicada (i.e., mejor productividad de agua según Fereres & Soriano 2007). Además, RDS puede servir para controlar el crecimiento vegetativo en fincas con un marco de plantación intensivo (>1000 árboles/ha) o en el caso de variedades muy vigorosas. A diferencia del RDS, el riego deficitario controlado (RDC) reduce el agua aplicada en una etapa fenológica donde el rendimiento del cultivo no es muy sensible al estrés hídrico (Goldhamer et al. 1999; Selles et al. 2006; Iniesta et al. 2009). Esta estrategia es normalmente utilizada en olivo en el verano por un periodo de dos meses, durante y después del endurecimiento del

endocarpo (i.e., el carozo), con poca reducción en la cantidad de aceite cosechada al fin de la temporada.

En el olivo, los estomas están ubicados sólo en la superficie inferior de la hoja y reducen su apertura cuando el agua es limitante; de esta manera disminuye la tasa de transpiración. La capacidad de esta especie para mantener un cierto nivel de actividad metabólica (incluyendo fotosíntesis bajo condiciones de estrés hídrico) está relacionada en parte al control estomático (e.g., Fernández et al. 1997). La osmoregulación y la anatomía del xilema también tienen un papel importante en el funcionamiento de los árboles bajo estas condiciones (Dichio et al 2005, 2009; Fernández et al. 2006).

Fernández et al. (1997) observaron que la conductancia foliar bajó de manera proporcional al déficit de presión de vapor hasta aproximadamente 3.5 kPa, pero no se redujo más entre 3.5 y 7 kPa. Giorio et al. (1999) encontraron relaciones fuertes que indicaron que tanto la conductancia foliar como el potencial agua de las hojas bajan cuando el contenido hídrico del suelo es limitante. En términos generales, el olivo no puede ser clasificado ni como una especie isohídrica (i.e., control estomático estricto resultando en un umbral mínimo de potencial agua para cierre estomático) ni tampoco anisohídrica (i.e., poco control estomático sin un umbral claro). Aunque los estomas se cierran parcialmente en respuesta al estrés hídrico, los árboles maduros de olivo pueden recuperarse de condiciones extremas de sequía que resultan en potenciales agua de hasta -8 MPa (Moriani et al. 2002). En árboles jóvenes en macetas, Pérez-López et al. (2008) redujeron el potencial agua xilemático de las plantas a -4 MPa al suspender el riego, y observaron que a los 5 días luego de reiniciar el riego las plantas se habían recuperado hasta valores de potencial similares a los de las plantas control. En cambio, la recuperación de la conductancia foliar fue un poco más lenta. Esta recuperación rápida del estado hídrico de las plantas desde potencial agua tan bajos podría estar relacionada al diámetro de los vasos xilemáticos y al número de vasos. El olivo posee vasos xilemáticos muy finos (40  $\mu\text{m}$ ) y

tiene el doble de densidad de vasos por área transversal de tejido xilemático comparado con lo observado en el naranjo (Fernández et al. 2006). Sin embargo, la relación entre el espesor de las paredes y el diámetro de los vasos, un indicador de resistencia a embolismos (Hacke & Sperry 2001), no fue mayor en olivo que en el naranjo.

Aunque no todos los mecanismos subyacentes a las respuestas del olivo a estrés hídrico son bien comprendidos, el flujo de savia del árbol entero por lo general tiene una correlación alta con otros parámetros vinculados al estatus hídrico de la planta, tales como el potencial agua de las hojas, el potencial agua xilemático y la conductancia foliar (Greven et al. 2009). Además, existiría una respuesta curvilínea entre la cantidad de agua aplicada y estas variables (i.e., hay menos cambio en la respuesta cuanto más riego es aplicado; Ben-Gal et al. 2009). La robustez de estas correlaciones genera confianza en el uso de medidas ecofisiológicas para la programación del riego. De hecho, un sistema automatizado de riego utilizando medidas de flujo de savia ya está bajo evaluación (Fernández et al. 2008), y potencialmente podrían usarse de modo similar las variaciones diarias en el diámetro del tronco o de ramas (Fernández & Cuevas 2010; Ortuño et al. 2010). En olivo tiene lugar una contracción diaria del tronco (i.e., diferencia entre los diámetros máximo y mínimo durante el día) de aproximadamente 100-1000  $\mu\text{m}$ , dependiendo de las condiciones ambientales (Moreno et al. 2006). Sin embargo, la dinámica de la contracción del tronco en olivo es compleja, con un aumento en contracción diaria en comparación a árboles bien regados cuando el estrés hídrico es moderado y una reducción cuando hay un estrés severo (Moriani et al. 2000). También se encontraron buenas correlaciones entre la temperatura del canopeo (medida con cámaras infrarrojas) y otras medidas fisiológicas (e.g., conductancia foliar). Bajo condiciones de estrés hídrico, la temperatura de la hoja aumenta cuando se reducen la conductancia de vapor de agua y, por lo tanto, también la disipación de calor. Esta tecnología ya ha sido adaptada para uso en aviones y satélites para detectar estrés hídrico en lotes enteros de olivo

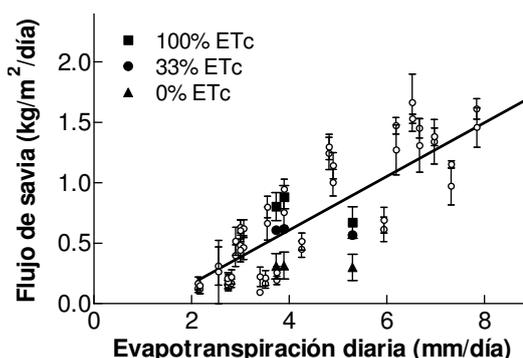
en la región de Andalucía en el sur de España (Sepulcre-Cantó et al. 2006, 2009).

## LA OLIVICULTURA EN ARGENTINA: EL CASO DE AIMOGASTA

Como fuera mencionado anteriormente, el clima de la nueva zona de producción de olivo en Argentina (Catamarca, La Rioja y San Juan) es más extremo que el clima de zonas mediterráneas, ya que incluye mayores temperaturas y menos precipitación. Estas diferencias y la falta de una base de conocimiento local han generado mucha incertidumbre y variación en la cantidad de agua aplicada. Por ejemplo, la baja precipitación en el noroeste de Argentina en el invierno ha determinado que algunos productores rieguen más que 100% ETC durante el invierno para imitar las condiciones de alta precipitación en el Mediterráneo, y que otros productores no rieguen para tratar de lignificar las plantas frente a las heladas. Un estudio realizado en Aimogasta, La Rioja, con la variedad "Manzanilla fina" indicó que la suspensión del riego por más de 40 días en el invierno se asoció a una leve disminución en el potencial agua de la hoja y a la conductancia foliar; sin embargo, estas mismas variables se recuperaron pronto cuando los árboles fueron regados nuevamente (Rousseaux et al. 2008). Este resultado es consistente con la recuperación de un estrés hídrico más severo como el visto por Pérez-López et al. (2008) en España. Durante los meses del invierno, Rousseaux et al. (2008, 2009) concluyeron que un cultivo maduro tiene un consumo de agua de 30-40% del ETo (i.e., un Kc=0.30-0.40).

Una evaluación más general del consumo del agua por el cultivo, usando la metodología clásica, donde parcelas fueron regadas con cinco niveles de riego distinto, encontró que el rendimiento máximo ocurrió con un riego equivalente a 70-80% de ETo (Correa-Tedesco et al. 2010), y no aumentó con cantidades de agua por encima de este nivel. En cambio, variables de crecimiento vegetativo como la elongación de ramas y el incremento en el área

seccional del tronco no mostraron un umbral claro, aumentando con la cantidad de agua aplicada aún por encima de 100% de la ETo durante toda la temporada. El crecimiento que ocurrió cuando el riego era superior a un 70-80% de ETo podría ser considerado como excesivo, ya que no resultó en más rendimiento. Eso podría deberse a la conjunción de alta disponibilidad de agua y altas temperaturas en la primavera, coincidente con el momento en que la tasa del crecimiento del cultivo es máxima. En una zona más fría en España con árboles de menor vigor vegetativo, Gómez del Campo et al. (2008) observaron ramas que



**Figura 3.** Flujo de savia diario ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{área foliar}\cdot\text{día}^{-1}$ ) sobre un rango amplio de evapotranspiración diaria. Los valores de los símbolos claros son promedios diarios  $\pm$  error estándar por dos grupos de tres árboles, y están adaptados de Rousseaux et al. (2009) con  $\text{Flujo de savia}=(0.21\cdot\text{ETo})-0.24$  ( $r^2=0.84$ ). Los símbolos negros representan el control (100% de ETC) y dos tratamientos (33% y 0% de ETC) de un ensayo de riego deficitario controlado en post-cosecha realizado en Aimogasta (La Rioja). Estos valores son promedios diarios  $\pm$  error estándar ( $n=2$  árboles) para el 16/04/2009-18/04/2009.

**Figure 3.** Daily sap flow ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  of leaf area  $\cdot\text{day}^{-1}$ ) for a wide range of daily evapotranspiration. The values of the clear symbols are daily means  $\pm$  standard error for two groups of three trees, and are adapted from Rousseaux et al. (2009) with  $\text{Sap flow}=(0.21\cdot\text{ETo})-0.24$  ( $r^2=0.84$ ). The dark symbols represent the control (100% ETC) and two treatments (33% and 0% ETC) from a post-harvest regulated deficit irrigation study in Aimogasta (La Rioja). These values are daily means  $\pm$  standard error ( $n=2$  trees) from 16/04/2009 to 18/04/2009.

**Tabla 3.** Potencial agua xilemático al mediodía ( $\psi_x$ ), conductancia foliar ( $g_l$ ), contracción diaria del tronco (CDT) y tasa de crecimiento diario del tronco (TCT) para el control (100% de evapotranspiración del cultivo) y los tratamientos de riego deficitario controlado post-cosecha (66%, 33% y 0% ETc). CDT y TCT son promedios de 10 días (del 14/04/2009 al 23/04/2009).  $\psi_x$  y  $g_l$  fueron medidos el 22 de abril. Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas a  $P < 0.05$  usando la prueba de Tukey de comparaciones de promedios múltiples.

**Table 3.** Midday stem water potential ( $\psi_x$ ), foliar conductance ( $g_l$ ), maximum daily trunk shrinkage (CDT), and the daily trunk growth rate (TCT) for the control (100% of crop evapotranspiration) and the post-harvest regulated deficit irrigation treatments (66%, 33%, and 0% ETc). CDT and TCT are 10-day averages (14/04/2009 to 23/04/2009).  $\psi_x$  and  $g_l$  were measured on April 22. Different letters represent statistically significant differences at  $P < 0.05$  using Tukey's multiple mean comparison test.

ETc (%)	$\psi_x$ (MPa)	$g_l$ (mmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	CDT ( $\mu$ m)	TCT ( $\mu$ m/día)
100	-1.4 $\pm$ 0.1 a	209 $\pm$ 13 a	234 $\pm$ 26 a	29.0 $\pm$ 3.2 a
66	-1.6 $\pm$ 0.05 ab	217 $\pm$ 7 a	231 $\pm$ 4 a	21.9 $\pm$ 1.7 ab
33	-1.9 $\pm$ 0.1 b	179 $\pm$ 8 a	224 $\pm$ 8 a	8.3 $\pm$ 0.7 bc
0	-2.9 $\pm$ 0.2 c	127 $\pm$ 15 b	177 $\pm$ 17 a	-4.2 $\pm$ 1.6 c

llegaron a su largo máximo con menos riego en relación a la ETo (i.e., con un menor Kc).

Un estudio complementario utilizando una metodología fisiológica con estimaciones de T a partir de medidas de flujo de savia y Es usando microlisímetros en varios momentos del año, mostró que la ETc fue aproximadamente 60% del ETo en un tratamiento de riego moderado (850 mm/año) y 85-90% del ETo en un tratamiento de riego alto (1800 mm/año) cuando todos los valores fueron normalizados a una finca madura (Rousseaux et al. 2009). La ETc fue mayor en el tratamiento de riego alto a causa de un aumento marcado en Es, mientras T no aumentó significativamente en la mayoría de las fechas porque el riego moderado sólo fue marginalmente más bajo que la demanda hídrica del cultivo. Además, aunque no se pudo cuantificarlo, es probable que el drenaje bajo la zona radical (0-1 m en profundidad) en el tratamiento de riego alto haya sido considerable.

Los valores de flujo de savia obtenidos en Aimogasta fueron de unos 1.5 kg.m<sup>-2</sup> área foliar.d<sup>-1</sup> durante días calurosos del verano (Figura 3). Estos valores son parecidos a los observados por Fernández et al. (2006, 2008) para la misma ETo (ver Tabla 2). El flujo de savia también estuvo fuertemente relacionado con los promedios diarios de temperatura del aire, DPV y radiación solar (Rousseaux et al.

2009). Además, nuestros valores de flujo de savia están de acuerdo con los valores de transpiración del modelo de simulación de Orgaz et al. (2007) que fue desarrollado utilizando datos de Córdoba, España.

Al combinar los resultados de las metodologías clásicas y fisiológicas, concluimos que el consumo de agua en fincas maduras en Aimogasta es aproximadamente 70-75% de ETo (1100-1200 mm/año). Estimaciones en California (Goldhamer et al. 1993) con la misma variedad ("Manzanilla fina") y sistema de riego (i.e., riego por goteo) dan un porcentaje de ETo muy similar. Sin embargo, la cantidad de agua aplicada en Aimogasta debería ser más alta que en California porque la ETo anual es 15-20% mayor, y la precipitación efectiva es generalmente menor.

Para entender mejor las respuestas al déficit hídrico en olivo y desarrollar estrategias de riego nuevas, hemos iniciado un estudio de riego deficitario controlado (RDC) de post-cosecha en Aimogasta. El primer año del estudio incluyó un control bien regado (100% de ETc) y tres tratamientos de riego deficitario (66%, 33% y 0% de ETc) desde mediados de febrero hasta los principios de mayo, 2009. Cerca del fin del ensayo, el flujo de savia de los tratamientos de 33% ETc y de 0% ETc (i.e., sin regar) fue 23% y 50% más bajo que el control, respectivamente (Figura

3). El potencial agua xilemático ( $\psi_x$ ) se redujo 26% y 52% para los mismos tratamientos (33% ETc, sin regar) y la conductancia foliar ( $g_f$ ) se redujo 14% y 39% (Tabla 3). Además, la tasa del crecimiento del tronco (TCT) fue 71% más baja en el tratamiento de 33% ETc en comparación al control, y la TCT de "sin regar" fue negativa. En cambio, la contracción diaria del tronco (CDT) solamente fue 4% y 24% menor que el control en 33% ETc y "sin regar", respectivamente, y las diferencias no fueron significativas estadísticamente. Aunque la dinámica de las respuestas debe ser mejor evaluada, estos resultados sugieren que el flujo de savia y otras variables fisiológicas como  $\psi_x$  y  $g_f$  responden en forma similar al estrés hídrico en olivo, como fuera postulado por Greven et al. (2009). La TCT podría ser una variable con alta sensibilidad al estrés hídrico, pero no hay resultados suficientemente consistentes entre estudios para hacer generalizaciones (Cuevas et al. 2010; Moriana et al. 2010).

## CONCLUSIONES

Las temperaturas altas en el noroeste de Argentina en el invierno y primavera resultan en una evapotranspiración potencial anual (ETo) aproximadamente 15-20% mayor que en la Cuenca Mediterránea, donde tradicionalmente se cultiva el olivo. Resultados experimentales de Aimogasta (La Rioja) confirman la suposición que el consumo de agua por el cultivo es mayor en el NOA (1100-1200 mm/año) que en el Mediterráneo (900-1000 mm/año). Además, en muchas zonas, el riego necesario en el NOA es más que el doble por la falta de precipitación.

La combinación de temperaturas altas en la primavera y de riego desmedido puede resultar en un crecimiento vegetativo excesivo que no se traduce en un aumento del rendimiento del cultivo, como encontramos experimentalmente en Aimogasta (Correa-Tedesco et al. 2010). El desarrollo de estrategias de riego deficitario controlado (RDC) en la primavera podría permitir ahorrar agua y mejorar la relación entre crecimiento vegetativo y reproductivo. Además, el RDC podría ser utilizado en varios

momentos del año. Resultados preliminares de un ensayo de riego deficitario controlado en post-cosecha indican que varios parámetros fisiológicos se recuperan rápidamente de estrés hídrico.

Considerando que la olivicultura representa 80-90% del agua dulce utilizada en las provincias de Catamarca y La Rioja, un mejor conocimiento de la ecofisiología del cultivo y su respuesta bajo las condiciones ambientales del NOA es crítico para reducir el agua regada. Eso podría repercutir fuertemente en el balance de agua de la región y tendría consecuencias sobre la sustentabilidad del agrosistema.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Agroaceitunera S.A. por el acceso a sus fincas comerciales y Eduardo Barbero por ayuda técnica en el campo. Los comentarios y sugerencias de los dos revisores, Dres. Edmundo Ploschuk y Roberto Fernández Aldúncin, mejoraron el manuscrito sustancialmente. Los estudios de investigación en Aimogasta (La Rioja) fueron financiados por el Ministerio de Ciencia y Tecnología Argentina (ANPCyT - PICT 32218; COFECyT - PPIP 121). PSS y MCR son investigadores de CONICET.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, RG; LS PEREIRA; D RAES & M SMITH. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. FAO, Rome.
- AYBAR V. 2010. *Floración en olivo (Olea europaea L.): evaluación del ajuste de un modelo predictivo para las condiciones del Chaco Árido argentino y utilización de hormonas exógenas*. Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires.
- AYERZA, R & GS SIBBETT. 2001. Thermal adaptability of olive (*Olea europaea* L.) to the Arid Chaco of Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* **84**: 277-285.
- BEN-GAL, A; N AGAM; V ALCHANATIS; Y COHEN; U YERMIYAHU; ET AL. 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrig. Sci.* **27**:367-376.

- BONACHELA, S; F ORGAZ; FJ VILLALOBOS & E FERERES. 2001. Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards. *Irrig. Sci.* **20**:65-71.
- BEEDE, RH & DA GOLDHAMER. 2005. Olive Irrigation Management. Pp. 61-69 en: Sibbett, GS & L Ferguson (eds.). *Olive Production Manual*. University of California, Oakland. EE.UU.
- CECI, LN & AA CARELLI. 2010. Compositional data review of monovarietal Argentinian olive oils. Pp. 71-97 en: Tomás, MB (ed.). *Advances in Fats and Oil Research*. Transworld Research Network, Kerala, India.
- CONNOR, DJ. 2005. Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Aust. J. Agric. Res.* **56**:1181-1189.
- CONNOR, DJ & E FERERES. 2005. The physiology of adaptation and yield expression in olive. *Hortic. Rev.* **31**:155-229.
- CORREA-TEDESCO, G; MC ROUSSEAU & PS SEARLES. 2010. Plant growth and yield responses in olive (*Olea europaea*) to different irrigation levels in an arid region of Argentina. *Agric. Water Manage.* **97**:1829-1837.
- CUEVAS, MV; JM TORRES-RUIZ; R ÁLVAREZ; MD JIMÉNEZ; J CUERVA; ET AL. 2010. Assessment of trunk diameter variation derived indices as water stress indicators in mature olive trees. *Agric. Water Manage.* **97**:1293-1302.
- DE MELO-ABREU, JP; D BARRANCO; AM CORDEIRO; J TOUS; BM ROGADO; ET AL. 2004. Modelling olive flowering date using chilling for dormancy release and thermal time. *Agric. Forest Meteorol.* **125**:117-127.
- DICHIO, B; C XILOYANNIS; A SOFO & G MONTANARO. 2005. Osmotic regulation in leaves and roots of olive trees during a water deficit and rewatering. *Tree Physiol.* **26**:179-185.
- DICHIO, B; G MARGIOTTA; C XILOYANNIS; SA BUFO; A SOFO; ET AL. 2009. Changes in water status and osmolyte contents in leaves and roots of olive plants (*Olea europaea* L.) subjected to water deficit. *Trees* **23**:247-256.
- FERERES, E & JR CASTEL. 1981. Drip irrigation management. Division of Agricultural Sciences. *University of California Publication Leaflet* 21259.
- FERERES, E & MA SORIANO. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J. Exp. Bot.* **58**:147-159.
- FERERES, E. 2008. The future of irrigation in horticulture. *Chronica Hortic.* **48**:9-11.
- FERNÁNDEZ, JE; F MORENO; IF GIRON & OM BLAZQUEZ. 1997. Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant Soil* **190**:179-192.
- FERNÁNDEZ, JE & F MORENO. 1999. Water use by the olive tree. *J. Crop Prod.* **2**:101-162.
- FERNÁNDEZ, JE; A DÍAZ-ESPEJO; JM INFANTE; P DURAN; MJ PALOMO; ET AL. 2006. Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit and partial rootzone drying. *Plant Soil* **284**: 273-291.
- FERNÁNDEZ, JE; PJ DURÁN; MJ PALOMO; A DIAZ-ESPEJO; V CHAMORRO; ET AL. 2006. Calibration of sap flow estimated by the compensation heat pulse method in olive, plum and orange trees: relationships with xylem anatomy. *Tree Physiol.* **26**:719-728.
- FERNÁNDEZ, JE; A DÍAZ-ESPEJO; R D'ANDRIA; L SEBASTIANI & R TOGNETTI. 2008. Potential and limitations of improving olive orchard design and management through modelling. *Plant Biosyst.* **142**:130-137.
- FERNÁNDEZ, JE & MV CUEVAS. 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agric. Forest Meteorol.* **150**:135-151.
- FAO. 2010. *Aquastat*. [www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm).
- GARCÉS-RESTREPO, C; D VERMILLION & G MUÑOZ. 2007. Irrigation management transfer: worldwide efforts and results. *FAO Water Reports No. 32*. FAO, Roma.
- GIORIO, P; G SORRENTINO & R D'ANDRIA. 1999. Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environ. Exp. Bot.* **42**:95-104.
- GIRONA, J; M LUNA; M ARBONES; J MATA; J RUFAT; ET AL. 2002. Young olive tree responses (*Olea europaea*, cv "Arbequina") to different water supplies. Water function determination. *Acta Hortic.* **568**:277-280.
- GLEICK, PH. 2003. Water use. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **28**:275-314.
- GOLDHAMER, DA; J DUNAI & L FERGUSON. 1993. Water use requirements of Manzanillo olives and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Hortic.* **335**:365-372.
- GOLDHAMER, DA. 1999. Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Hortic.* **474**:369-372.
- GÓMEZ DEL CAMPO, M; A LEAL & C PEZUELA. 2008. Relationship of stem water potential and leaf conductance to vegetative growth of young olive trees in a hedgerow orchard. *Aust. J. Agric. Res.* **59**:270-279.
- GREVEN, M; S NEAL; S GREEN; B DICHIO & B CLOTHIER. 2009. The effects of drought on the water use, fruit development and oil yield from young olive trees. *Agric. Water Manage.* **96**:1525-1531.
- GRATTAN, SR; MJ BERENGUER; JH CONNELL; VS

- POLITO & PM VOSSEN. 2006. Olive oil production as influenced by different quantities of applied water. *Agric. Water Manage.* **85**:133-140.
- HACKE, UG & JS SPERRY. 2001. Functional and ecological xylem anatomy. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* **4**:97-115.
- INIESTA, F; L TESTI; F ORGAZ & FJ VILLALOBOS. 2009. The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *Eur. J. Agron.* **30**:258-265.
- MANNINA, L; G FONTANAZZA; M PATUMI; G ANSANELLI & A SEGRE. 2001. Italian and Argentine olive oils: a NMR and gas chromatographic study. *Grasas y Aceites* **52**:380-388.
- MCNAUGHTON, KG & PG JARVIS. 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. Pp. 1-47 en: KOSLOWSKY, TT (ed.). *Water Deficit and Plant Growth*. Academic Press, New York. EE.UU.
- METHENEY, PD; L FERGUSON; DA GOLDHAMER & J DUNAI. 1994. Effects of irrigation on Manzanillo olive flowering and shoot growth. *Acta Hortic.* **356**: 168-171.
- MORENO, F; W CONEJERO; MJ MARTÍN-PALOMO; IF GIRÓN & A TORRECILLAS. 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agric. Water Manage.* **84**:290-294.
- MORIANA, A; E FERERES; F ORGAZ; J CASTRO; MD HUMANES; ET AL. 2000. The relations between trunk diameter fluctuations and tree water status in olive trees (*Olea europaea* L.). *Acta Hortic.* **357**: 293-297.
- MORIANA, A; FJ VILLALOBOS & E FERERES. 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. *Plant Cell Environ.* **25**:395-405.
- MORIANA, A; F ORGAZ; M PASTOR & E FERERES. 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **128**:425-431.
- MORIANA, A; IF GIRÓN; MJ MARTÍN-PALOMO; W CONEJERO; MF ORTUÑO; ET AL. 2010. New approach for olive trees irrigation scheduling using trunk diameter sensors. *Agric. Water Manage.* **97**:1822-1828.
- ORGAZ, F; FJ VILLALOBOS; L TESTI & E FERERES. 2007. A model of daily mean canopy conductance for calculating transpiration of olive canopies. *Funct. Plant Biol.* **34**:178-188.
- ORGAZ, F & E FERERES. 2008. Riego. Pp. 337-362 en: BARRANCO, D; R FERNANDEZ-ESCOBAR & L RALLO (eds.). *El Cultivo de Olivo*. Mundi-Prensa, Madrid. España.
- ORTUÑO, MF; W CONEJERO; F MORENO; A MORIANA; DS INTRIGLIOLO; ET AL. 2010. Could trunk diameters sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agric. Water Manage.* **97**:1-11.
- PÉREZ-LÓPEZ, D; MC GIJÓN & A MORIANA. 2008. Influence of irrigation rate on the rehydration of olive tree plantlets. *Agric. Water Manage.* **95**:1161-1166.
- RAMOS, AF & FL SANTOS. 2009. Water use, transpiration, and crop coefficients for olives (cv. Cordovil), grown in orchards in Southern Portugal. *Biosystems Eng.* **102**:321-333.
- RANA, G & N KATERJI. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *Eur. J. Agron.* **13**:125-153.
- RITCHIE, JT. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* **8**:1204-1213.
- RONDANINI, D; D RUIZ; S ARAUJO; D DEL CARRIL; EA GARCÍA; ET AL. 2007. Caracterización de los aceites varietales de oliva virgen elaborados en los valles cálidos de La Rioja (Argentina). Campañas 2005 y 2006. *Aceites y Grasas* **69**:654-659.
- ROUSSEAU, MC; JP BENEDETTI & PS SEARLES. 2008. Leaf-level responses of olive trees (*Olea europaea*) to the suspension of irrigation during the winter in an arid region of Argentina. *Sci. Hortic.* **115**:135-141.
- ROUSSEAU, MC; PI FIGUEROLA; G CORREA-TEDESCO & PS SEARLES. 2009. Seasonal variations in sap flow and soil evaporation in an olive (*Olea europaea* L.) grove under two irrigation regimes in an arid region of Argentina. *Agric. Water Manage.* **96**:1037-1044.
- SAGPYA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos). 2008. *Cadenas Alimentarias: Producción olivícola*. [www.alimentosargentinos.gov.ar/olivicola/](http://www.alimentosargentinos.gov.ar/olivicola/).
- SELLES, G; ER FERREYRA; MI SELLES & SG LEMUS. 2006. Efecto de diferentes regimenes de riego sobre la carga frutal, tamaño de fruta y rendimiento del olivo cv. sevillana. *Agric. Técnica* **66**:48-56.
- SEPULCRE-CANTÓ, G; PJ ZARCO-TEJADA; JC JIMÉNEZ-MUÑOZ; JA SOBRINO; E DE MIGUEL; ET AL. 2006. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agric. For. Meteorol.* **136**:31-44.
- SEPULCRE-CANTÓ, G; PJ ZARCO-TEJADA; JA SOBRINO; J BERNI; JC JIMÉNEZ-MUÑOZ; ET AL. 2009. Discriminating irrigated and rainfed olive orchards with thermal ASTER imagery and DART 3D simulation. *Agric. For. Meteorol.* **149**:962-975.
- TESTI, L; FJ VILLALOBOS & F ORGAZ. 2004.

- Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agric. For. Meteorol.* **121**:1-18.
- TESTI, L; FJ VILLALOBOS; F ORGAZ & E FERERES. 2006. Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrig. Sci.* **24**:69-76.
- TOGNETTI, R; R D'ANDRIA; G MORELLI; D CALANDRELLI & F FRAGNITO. 2004. Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant Soil* **263**:249-264.
- TOGNETTI, R; A GIOVANNELLI; A LAVINI; G MORELLI; F FRAGNITO; ET AL. 2009. Assessing environmental controls over conductances through the soil-plant-atmosphere continuum in an experimental olive tree plantation of southern Italy. *Agric. For. Meteorol.* **129**:1229-1243.
- VILLALOBOS, FJ; F ORGAZ; L TESTI & E FERERES. 2000. Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* **13**:155-163.
- VILLALOBOS, FJ; L TESTI; J HIDALGO; M PASTOR & F ORGAZ. 2006. Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *Eur. J. Agron.* **24**:296-303.
- WILLIAMS, DG; W CABLE; K HULTINE; JCB HOEDJES; EA YEPEZ; ET AL. 2004. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. *Agric. For. Meteorol.* **125**:241-258.
- YUNUSA, IAM; IK NUBERG; S FUENTES; P LU & D EAMUS. 2008. A simple field validation of daily transpiration derived from sapflow using a porometer and minimal meteorological data. *Plant Soil* **305**:15-24.