



***RELACIONES HÍDRICAS Y PROGRAMACIÓN DE  
RIEGO EN ACEITUNA DE MESA (OLEA  
EUROPAEA, L. CV. MANZANILLA DE SEVILLA),  
BASADA EN MEDIDAS DIRECTAS EN PLANTA.***

Memoria que presenta  
**Ignacio F. Girón Moreno**  
Para optar al título de Doctor por la  
Universidad de Sevilla

Sevilla, Julio de 2016





# **RELACIONES HÍDRICAS Y PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN ACEITUNA DE MESA (OLEA EUROPAEA, L. CV. MANZANILLA DE SEVILLA), BASADA EN MEDIDAS DIRECTAS EN PLANTA.**

Visado en Sevilla, Julio de 2016

LOS DIRECTORES

Dr. D. Félix Moreno Lucas  
Profesor de Investigación  
Sevilla  
IRNAS, CSIC

Dr. D. Alfonso Moriana Elvira  
Profesor Titular de la Universidad de

EL TUTOR

Dra. Dña. Elena Fernández Boy  
Profesor Titular de la Universidad de Sevilla



**FACULTAD DE QUÍMICA**

Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola

**D<sup>a</sup>. ROSARIO VAZ PARDAL, DIRECTORA DEL DEPARTAMENTO DE CRISTALOGRAFÍA, MINERALOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA.**

**Certifica:** Que la presente Memoria de Investigación titulada “RELACIONES HÍDRICAS Y PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN ACEITUNA DE MESA (OLEA EUROPAEA, L. CV. MANZANILLA DE SEVILLA), BASADA EN MEDIDAS DIRECTAS EN PLANTA”, presentada por D. Ignacio F. Girón Moreno para optar al grado de Doctor, ha sido realizada en el marco del Programa de Doctorado en Recursos Naturales y Medioambiente del Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola.

En Sevilla, Julio de 2016

**DOCTOR D. JOSÉ ENRIQUE FERNÁNDEZ LUQUE, DIRECTOR DEL INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES Y AGROBIOLOGÍA DE SEVILLA (IRNAS) DEL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)**

**Certifica:** Que la presente Memoria de Investigación titulada "**RELACIONES HÍDRICAS Y PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN ACEITUNA DE MESA (OLEA EUROPAEA, L. CV. MANZANILLA DE SEVILLA), BASADA EN MEDIDAS DIRECTAS EN PLANTA**", presentada por **D. Ignacio F. Girón Moreno** para optar al grado de Doctor, ha sido realizada en el Departamento de **Protección del Sistema Suelo, Planta, Agua del IRNAS**, bajo la dirección del **Dr. D. Félix Moreno Lucas del IRNAS-CSIC** y el **Dr. D. Alfonso Moriana Elvira de la Universidad de Sevilla** reuniendo todas las condiciones exigidas a los trabajos de Tesis Doctorales.

En Sevilla, Julio de 2016



# ÍNDICE.

<i>ÍNDICE</i> .....	7
<i>1 INTRODUCCIÓN</i> .....	1
1.1 El cultivo del olivo.....	1
1.2 Fisiología del olivo .....	2
1.2.1 Adaptación morfológica a la sequía.....	2
1.2.2 Relaciones hídricas .....	3
1.2.3 Potencial hídrico .....	3
1.2.4 La conductancia estomática.....	5
1.2.5 La variación del diámetro del tronco .....	5
1.2.6 Flujo de savia.....	7
1.3 Efecto del estrés hídrico en el desarrollo del cultivo .....	8
1.4 Programación del riego en el olivo .....	10
1.4.1 El riego deficitario controlado (RDC) .....	11
1.4.2 Utilización de las variaciones micrométricas del diámetro del tronco para la programación del riego. 13	
<i>2 OBJETIVOS</i> .....	15
<i>3 MATERIALES Y MÉTODOS</i> .....	17
3.1 Zona de estudio.....	17
3.2 Suelo.....	18
3.3 Descripción de la parcela experimental.....	19
3.4 Clima.....	21
3.5 Variables meteorológicas.....	21
3.6 Tratamientos de riego .....	22

3.7	Medidas del agua en el suelo.....	27
3.8	Medidas en planta.....	28
3.9	Medidas del crecimiento de ramos.....	28
3.10	número de inflorescencias y frutos .....	28
3.11	Crecimiento del fruto y cosecha.....	28
3.12	Medidas del estado hídrico de la planta .....	29
3.12.1	Potencial hídrico .....	29
3.12.2	Conductancia estomática en hoja.....	32
3.13	Relaciones hídricas de las hojas y del fruto.....	32
3.14	Medida de las variaciones del diámetro del tronco mediante dendrómetros .....	33
4	<i>CAPITULO 1. Cambios en la respuesta fisiológica entre hojas y frutos durante un estrés hídrico moderado.....</i>	<i>37</i>
4.1	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
4.1.1	Resultados.....	37
4.1.2	Discusión .....	51
4.2	Conclusiones.....	55
5	<i>CAPITULO 2. Manejo de la influencia ambiental en los indicadores de la variación del diámetro del tronco.....</i>	<i>57</i>
5.1	Resultados y discusión.....	57
5.1.1	Resultados.....	57
5.1.2	Discusión .....	67
5.2	Conclusiones.....	72
6	<i>CAPITULO 3. Programación del riego deficitario controlado en aceituna de mesa basado en medidas de variación del diámetro del tronco.....</i>	<i>75</i>

6.1	Resultados y discusión.....	75
6.1.1	Resultados.....	75
6.1.2	Discusión.....	99
6.2	Conclusiones.....	105
7	<i>Conclusiones</i> .....	107
9	<i>Bibliografía</i> .....	109

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 EL CULTIVO DEL OLIVO

El olivo es posiblemente una de las plantas cultivadas más antiguas del mundo, su cultivo está extendido básicamente a la zona mediterránea y tradicionalmente en condiciones de secano cuyo único aporte hídrico provenía de las precipitaciones estacionales. A lo largo de la historia su uso no ha sido sólo como fuente de alimento sino también como medicamento, cosmética e incluso rituales paganos y religiosos (Amouretti, 1996).

Actualmente es un cultivo de gran importancia nivel mundial, según la FAO hay 9.499.931 ha de olivares, de las cuales 2.092.800 ha se encuentran en España, lo que supone aproximadamente un 22% de la superficie total mundial, seguida de Túnez con 1.645.100 ha e Italia con 1.190.800 ha (FAOSTAT, 2012). España es el primer país en el ranking de producción mundial de aceite de oliva, con una producción media anual en los últimos diez años de 1.000.000-1.200.000 toneladas, llegando a alcanzar 1.450.000 en recientes campañas (FAOSTAT, 2012).

La superficie del cultivo del olivo en España no se ha mantenido constante a lo largo de los años, ha evolucionado a medida que las condiciones cambiaban, dependiendo en general de la situación económica del sector. A partir de los años ochenta cambió sustancialmente la apreciación del consumidor por este producto y se incorporó a unas nuevas condiciones de regulación en la Unión Europea. Por estas razones, el sector, esperanzado ante el futuro, recuperó una parte de la superficie de este cultivo, perdida en años anteriores.

Según la encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos de España (ESYRCE), en el año 2014 la superficie total del olivar nacional era de 2.605.252 ha, de las cuales el 94,3% (2.455.501 ha) son de olivar de almazara, el 2,8% (75.080 ha) olivar de mesa y el 2,9% (74.671 ha) de olivar de doble aptitud. El mayor volumen de producción de aceite de oliva se encuentra en la región de Andalucía con un 60,2%, seguido de Castilla la Mancha con el 15,7%, Extremadura el 10 % y el resto de Comunidades Autónomas suman el 13,7% de la superficie nacional de olivar. Con respecto a la aceituna de mesa, el 73,1 % se encuentra en Andalucía, el 26,7 % en Extremadura, ocupando ambas comunidades prácticamente la totalidad de la superficie nacional. En la actualidad, Andalucía dedica al olivar una superficie que supera el millón y medio de hectáreas, lo que equivale al 43,9% de las tierras de cultivo y al 16% de la superficie total de la región. Como es bien conocido, la producción de aceite de oliva constituye una de las principales actividades económicas de Andalucía.

Este incremento en la producción, tanto de aceite como de aceituna de mesa, está relacionado con varios factores. En los últimos años se ha incrementado paulatinamente la densidad de las plantaciones, se han usado mejores variedades y se ha incrementado el uso del riego. Posiblemente uno de los factores más llamativos es el incremento de la cantidad de agua empleada en este cultivo.

Antes del año 1982, el Ministerio de Agricultura no separaba los datos de secano y regadío en este cultivo. El comienzo del crecimiento de la superficie de regadío se produjo desde principios de los 90, con una subida constante, recortando progresivamente las diferencias entre los dos sistemas de cultivo. Este incremento fue especialmente grande en el caso de la aceituna de mesa, en donde, actualmente, alrededor del 30% de la superficie nacional está en regadío (MAGRAMA, varios años). De acuerdo con estos datos, en los últimos años el olivar se ha convertido en el cultivo más importante a nivel nacional en superficie de regadío.

## **1.2 FISIOLÓGÍA DEL OLIVO**

### **1.2.1 ADAPTACIÓN MORFOLÓGICA A LA SEQUÍA**

El olivo es un árbol típico del clima mediterráneo, por lo que su cultivo está principalmente situado entre los 45° latitud Norte y los 45° latitud Sur, siendo capaz de desarrollarse con bajos contenidos de agua en el suelo. Posee la capacidad de realizar importantes cambios fisiológicos y morfológicos que contribuyen al mantenimiento hídrico de la planta, ajustando el consumo a la alta demanda ambiental y a los bajos niveles de agua en el suelo (Connor, 2005).

La morfología de las hojas de olivo es la típica de una especie muy adaptada a las condiciones de sequía. Las hojas se caracterizan por ser pequeñas, coriáceas, con los estomas concentrados en el envés y rodeados de una capa externa de pelos pubescentes (Rapoport, 1997). El control estomático, es posiblemente la respuesta fisiológica mejor documentada, tanto como respuesta al estrés como a las variaciones en la humedad ambiental (Fernández et al., 1997) que le proporciona un control importante de la transpiración. Las hojas de olivo reducen la carga de la radiación debido a su pequeño tamaño, la alta reflexión, y por su predominante posición vertical (Mariscal et al., 2000), además de moverse en situaciones de estrés hídrico para reducir la radiación incidente (Natali et al., 1999).

La mayoría de los árboles de plantaciones comerciales se producen mediante enraizamiento de estaquillas, por lo que el crecimiento radical no se desarrolla en un eje central. En este caso, se forman en la zona basal de la estaquilla múltiples raíces adventicias, que se comportan como raíces principales múltiples en el árbol. La profundidad y extensión lateral del sistema radical y el grado de ramificación dependen del tipo y profundidad del suelo, de la aireación y del contenido de agua del mismo (Fernández et al., 1991). La combinación de la capacidad del olivo para soportar un potencial hídrico foliar al mediodía extremadamente bajo,  $-8,0$  MPa, y el extenso desarrollo radical, mejoran la capacidad de extraer agua del suelo por debajo del punto de marchitez permanente (Fernández y Moreno, 1999; Moriana et al., 2002)

La continua bajada del potencial hídrico en la hoja, por efecto de la disminución del agua en el suelo, puede provocar la cavitación, dando como resultado la pérdida de la conductividad hidráulica del xilema (Tyree y Zimmerman, 2002). El olivo es una especie en la que la cavitación es menor. Este fenómeno se produce porque el sistema conductor del xilema está formado por vasos conductores más estrechos de lo habitual (Lo Gullo y Salleo, 1988), lo que repercute en mayores gradientes de potencial hídrico pero en menor probabilidad de cavitación de los vasos.

### **1.2.2 RELACIONES HÍDRICAS**

Las relaciones hídricas son el conjunto de respuestas de la fisiología de la planta a las variaciones ambientales y a las condiciones de estrés. Las variables que se pueden medir en las plantas para poder evaluar su estado hídrico frente a las variaciones del contenido de agua en el suelo y a la demanda atmosférica son muy diversas; siendo el potencial hídrico, la conductancia estomática, las variaciones micrométricas diarias del diámetro del tronco y la medida del flujo de savia las principales variables seleccionadas para comprender esas relaciones hídricas.

### **1.2.3 POTENCIAL HÍDRICO**

El potencial hídrico ( $\Psi$ , MPa) es uno de los indicadores más usados a la hora de conocer el estado hídrico de una planta. La medida de  $\Psi$  aporta información sobre el

movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, ya que el agua tiende a desplazarse desde las zonas de mayor a las de menor potencial hídrico. Las medidas de  $\Psi$  pueden hacerse en cualquier órgano de la planta. Hasta ahora, se han empleado frecuentemente las medidas de potencial hídrico de la hoja o potencial hídrico foliar, que varían como resultado de la falta de correspondencia entre las tres componentes que determinan el estado hídrico de una planta: absorción, translocación y pérdida de agua (Halevy, 1972; Kaufman y Hall, 1974), siendo éstas una descripción cuantitativa de los estados de energía libre. Por otro lado, su valor puede considerarse igual a la presión de la savia en el xilema de la hoja (Hanan, 1972; Castel y Fereres, 1972), parámetro fácil de medir en campo con la cámara de presión (Scholander et al., 1965).

Este parámetro es una de las medidas más tradicionales en todos los estudios de relaciones hídricas. El potencial hídrico varía a lo largo del día por efecto de las variaciones que la demanda evaporativa genera en el transporte del agua (Klepper, 1968). En el olivo los ciclos diarios de potencial hídrico, en ausencia de déficit hídrico, presentan un efecto claro del ambiente con valores mínimos alrededor del mediodía (Angelopoulos et al., 1996). El hecho de que la regulación estomática module la tasa de transpiración en función de la demanda evaporativa de la atmósfera, hace que estos valores mínimos de potencial hídrico permanezcan generalmente constantes hasta últimas horas de la tarde. El efecto de la demanda evaporativa en la variación del valor del potencial hídrico en diferentes días tiene una relación lineal con poca pendiente (Moriana y Fereres, 2004).

El déficit de agua en el suelo tiene un efecto muy marcado sobre el potencial hídrico en el olivo, disminuyéndolo para mantener el flujo de agua y así compensar las pérdidas por transpiración (Angelopoulos et al., 1996; Fernández et al., 1997; Moriana et al., 2002). El olivo es capaz de disminuir su potencial hídrico por debajo de valores que causarían la deshidratación y muerte de casi la totalidad de plantas cultivadas. Esto dota a esta especie de una capacidad de extraer agua del suelo por debajo del punto de marchitez permanente (Orgaz y Fereres, 1996). Ello supone, que las medidas de potencial hídrico sean muy buena referencia para cuantificar el nivel de estrés en el olivar. Tradicionalmente, en cultivos leñosos, se han empleado medidas del potencial hídrico antes del amanecer (coincidiendo con el máximo) y al mediodía. Este último puede realizarse en hoja descubierta y soleada o en hoja que previamente se ha cubierto para evitar su transpiración (el denominado potencial de tallo). McCutchan y Shackel (1992) en ciruelo, mostraron que el potencial de tallo es más sensible a las condiciones de estrés hídrico que los medidos al amanecer o en hoja descubierta

al mediodía. Esto ha supuesto que, en los últimos trabajos en cultivos leñosos, se emplee de forma más habitual el potencial de tallo.

#### **1.2.4 LA CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA**

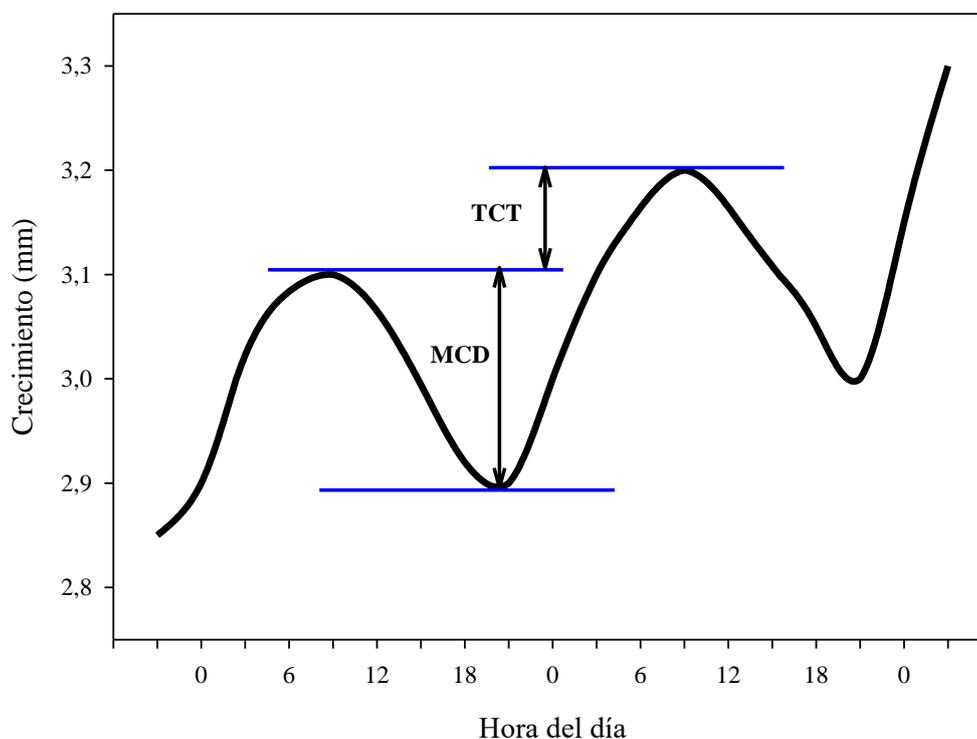
La conductancia estomática ( $g_s$ ) se define como el inverso de la resistencia que ofrecen los estomas al paso de  $CO_2$  y  $H_2O$  en la superficie de las hojas. Los estomas juegan un papel clave en la fisiología de la planta, ya que controlan tanto la fijación de  $CO_2$ , como la pérdida de agua por transpiración. Esto hace que su funcionamiento esté muy influenciado por las condiciones ambientales, tanto del aire (radiación, humedad, temperatura, concentración de  $CO_2$ ) como del suelo (contenido de agua).

Uno de los mecanismos más efectivos para evitar los valores críticos de potencial hídrico en situaciones de estrés hídrico, mencionados anteriormente, es el cierre estomático (Choat et al., 2012). El control estomático es también una ventaja en ambientes con grandes fluctuaciones tanto de la demanda evaporativa como de la humedad del suelo (Franks et al., 2007), como son los hábitats donde se desarrolla y cultiva el olivo (Fernández y Moreno, 1999). Los olivos minimizan las pérdidas de agua, en condiciones de demanda hídrica elevada, mediante la regulación estomática incluso en ausencia de estrés hídrico (Fernández et al., 1997; Moriana et al., 2002; Tognetti et al., 2009; Boughalled y Hajlaoui, 2011). Esto da lugar a ciclos diarios característicos con máximos a primera hora de la mañana y mínimos a partir de mediodía (Angelopoulos et al., 1996; Fernández et al., 1997). Este ciclo diario es característico de plantas resistentes a sequía en contraposición a otras especies más sensibles, en las que el ciclo diario es de una apertura máxima en ausencia de estrés (Tenhunen et al., 1987). Las variaciones de la conductancia estomática por efecto de la demanda evaporativa son cada vez menores conforme el estrés hídrico se incrementa (Moriana et al., 2002).

#### **1.2.5 LA VARIACIÓN DEL DIÁMETRO DEL TRONCO**

El tallo/tronco de todas las plantas tiene ciclos diarios de expansión y contracción, incluso en ausencia de estrés hídrico (Klepper et al., 1971). Estas oscilaciones (Figura 1) están producidas por el desfase entre la absorción radical y la transpiración de la planta, lo que da lugar a una deshidratación parcial, principalmente de la corteza (Brough et al., 1986). Antes

del amanecer, la planta se está rehidratando y el tronco se expande. A primeras horas de la mañana, la transpiración supera la capacidad de absorción del árbol y, para compensar este desfase, el tronco cede agua a la corriente transpiratoria, comenzando el periodo de deshidratación. Durante la tarde, cuando la absorción es mayor que la transpiración, el tronco comienza a rehidratarse empezando de nuevo un ciclo de expansión.



**Figura 1.** Esquema de dos ciclos diarios de expansión y contracción del tronco y de los parámetros empleados para caracterizar el estado hídrico de la planta. TCT (tasa de crecimiento del tronco). MCD (máxima contracción diaria).

El ciclo diario de variación del diámetro del tronco no es utilizado directamente para determinar el estado hídrico de la planta. Aunque ha habido diferentes interpretaciones de los parámetros a emplear, Goldhamer et al. (1999) definen, dentro de la curva, el diámetro máximo (valor máximo a primeras horas del día), el diámetro mínimo (valor mínimo a última hora de la tarde) y la máxima contracción diaria (diferencia entre los dos anteriores). Estos parámetros han sido habitualmente los más empleados, especialmente el último, a la hora de definir la respuesta al estrés hídrico (Ortuño et al., 2010; Fernández y Cuevas, 2010). El estrés hídrico da lugar a variaciones en el ciclo diario de contracción y expansión provocando un incremento muy acentuado de la máxima contracción diaria y una disminución del

crecimiento en la mayor parte de las especies estudiadas (Ortuño et al., 2010, Fernández y Cuevas, 2010).

La respuesta al estrés hídrico de la variación del diámetro del tronco en olivo, es sensiblemente diferente de la mayoría de los frutales. En olivos jóvenes, la MCD no se ve afectada por el estrés hídrico, aun con una reducción significativa del intercambio del gaseoso (Moriana y Fereres, 2002). Esta falta de respuesta también se ha observado en olivos maduros de diferentes variedades y en distintas condiciones edáficas y ambientales (Moriana et al., 2003; Moriana et al., 2010; Fernández et al., 2011; Cuevas et al., 2010). Moriana et al. (2010) sugieren que la ausencia de respuesta al estrés hídrico de la MCD está relacionada con el patrón de este indicador durante un ciclo de falta de agua. La relación entre MCD y el potencial hídrico en todos los árboles frutales es curvilínea, mostrando un incremento inicial de la MCD con la disminución del potencial hídrico hasta alcanzar un valor máximo, a partir del cual la MCD comienza a disminuir a medida que se hace más severo el estrés hídrico (Ortuño et al., 2010). En olivo, los valores máximos de MCD registrados se sitúan alrededor de 0.8-1 mm (Moriana et al., 2000) y se considera que la primera fase lineal de la curva hasta los valores máximos de MCD, están provocados por las variaciones de las condiciones en la demanda evaporativa (Pérez López et al., 2013). Esto da lugar a una “zona de incertidumbre” para este indicador ya que valores entre -1.4 hasta -2.0 MPa de potencial hídrico dan lugar a valores de MCD muy similares (Moriana et al., 2000; Moriana et al., 2010).

Los máximos diarios es el parámetro alternativo de los ya indicados (Figura 1), ya que su evolución es similar a la de los mínimos diarios. Los máximos diarios representan el crecimiento del tronco, sin embargo, su uso en valor absoluto tiene poco interés y es en realidad la tasa de crecimiento del tronco (TCT, Figura 1), la pendiente de la curva de diámetros máximos, la que sería un indicador de interés (Moriana y Fereres, 2002). La TCT está muy relacionada con la presencia de fruta en el árbol (Ortuño et al., 2010) por lo que su uso debe tener en consideración el estado fenológico en el que se está empleando.

### **1.2.6 FLUJO DE SAVIA.**

La transpiración de las plantas es la base de la fisiología vegetal y es el proceso que mayor interés ha despertado entre los investigadores. Su determinación supone una herramienta para identificar el nivel de estrés hídrico y, a la vez las necesidades de la planta. Los sensores de flujo de savia son una metodología que permite determinar la transpiración de

la planta de forma continua y en tiempo real. Moreno et al. (1996) utilizaron la técnica de compensación del pulso de calor para determinar el flujo de savia en olivos adultos y en las mismas parcelas que las utilizadas en el trabajo de la presente tesis. El trabajo de Moreno et al. (1996) fue el primero en el mundo en utilizar esta técnica en olivo, con lo que determinaron la transpiración del olivo en tiempo real. Esta metodología es, asimismo, de utilidad para la programación del riego en diversos frutales (Fernández et al, 2008).

### **1.3 EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL DESARROLLO DEL CULTIVO**

El efecto del estrés hídrico en las relaciones hídricas de las hojas ha sido ampliamente estudiado en el olivo (Bongi y Long, 1987; Angelopoulos et al., 1996; Fernández et al., 1997; Dichio et al., 1997, 2003, 2006; Moriana et al., 2002) pero se ha estudiado menos a nivel de fruto. El olivo es un árbol muy resistente a la sequía, en el que el estrés hídrico da lugar de forma progresiva a un ajuste osmótico a nivel de la hoja (Dichio et al., 1997, 2003, 2006); disminución del crecimiento vegetativo (Moriana y Fereres, 2002; Pérez-López et al., 2007); un fuerte control estomático (Angelopoulos et al., 1996; Moriana et al., 2002); y elevados niveles de deshidratación (Moriana et al., 2002).

Las plantas sometidas a un déficit hídrico sintetizan y acumulan aminoácidos, proteínas, azúcares y ácidos orgánicos (Ingram y Bartels, 1996). Las altas concentraciones de estos solutos contribuyen a la bajada del potencial osmótico originando un flujo de agua hacia el interior de la célula, manteniendo así el potencial de turgencia e incrementando la tolerancia de los tejidos a bajos potenciales hídricos del suelo (Tyree y Jarvis, 1992; Bray, 1993). Estos solutos también secuestran a las moléculas de agua, protegen a las membranas de la célula y el complejo de proteínas y permiten que la maquinaria metabólica continúe funcionando (Chaves et al., 2003). La bajada del potencial osmótico como resultado de la acumulación neta de solutos compatibles, se define como ajuste osmótico activo y puede ser determinado midiendo el potencial osmótico a plena turgencia (Girma y Krieg, 1992). Por otro lado, se denomina ajuste osmótico pasivo a los mecanismos que causan las pérdidas netas del agua del simplasto de los tejidos, provocando una reducción del volumen de la célula y un incremento en la concentración del soluto (Lakso, 1985).

Las relaciones hídricas en fruto han sido menos estudiadas que en hoja. El crecimiento del fruto requiere, entre otros factores, un adecuado flujo de agua hacia el interior del fruto y un óptimo estado de turgencia para ser capaces de soportar el crecimiento y la expansión

celular. Berger y Selles (1993) en melocotonero, sugirieron que el flujo del agua hacia el interior del fruto era la suma del transporte hídrico entre el xilema y el floema. De esta manera, cualquier cambio del estado fenológico y/o del estado hídrico del árbol puede cambiar el movimiento del agua, por consiguiente la transpiración del fruto. Greenspan et al. (1994,1996), describieron en uva cambios en el transporte de agua hacia el fruto con el envero. Durante el pre-envero la entrada de agua se produce vía xilema, mientras que en el post-envero corresponde al floema (Greenspan et al., 1994,1996). En el olivo, Proietti et al. (1999) encontraron una disminución de la fotosíntesis en fruto desde al principio del desarrollo del fruto hasta las 6-8 semanas después de la polinización. Dell'Amico et al (2012) sugirieron que en el olivo condiciones poco severas de estrés hídrico, durante el endurecimiento masivo del hueso, cambian el flujo de agua hacia el fruto desde el xilema y en las plantas no estresadas al floema.

A pesar de estar hablando de una de las especies más resistentes a las condiciones de sequía, los árboles, evidentemente, ven afectada su fisiología por efecto de la falta de agua en el suelo. La diferencia con otros frutales es que el nivel de afectación es mucho menor y por lo tanto, es una especie apta para condiciones muy limitantes de agua. Estos niveles de estrés hídrico varían según el estado fenológico de la planta, ya que los procesos que se ven alterados son diferentes y tendrán una repercusión distinta en la cosecha (Tabla 1). En el olivar es muy importante distinguir entre los efectos del déficit hídrico que se verán en el año en curso y cuales tendrán una repercusión en cosechas posteriores. El crecimiento vegetativo, por ejemplo, es un proceso que podría verse afectado durante todo el año (Tabla 1) dependiendo de la edad de la plantación. Sin embargo, el efecto más drástico de la reducción de este proceso se obtiene a largo plazo con la reducción de cosecha por el menor tamaño de los árboles (Caruso et al., 2013). La reducción del crecimiento también se ha relacionado con el incremento del ciclo vecero del olivo (Rallo, 1997), ya que el ciclo reproductivo del olivo es bienal. La capacidad de resistencia a la falta de agua en el suelo supone que el olivar pueda responder de una forma muy importante al riego, y lo que es más importante, a dosis de agua relativamente pequeñas en comparación con otras especies como las hortícolas (Moriani et al., 2003).

**Tabla 1. Efectos del déficit hídrico en los procesos de crecimiento y producción del olivo (Fuente: Orgaz y Fereres, 1997. Elaboración propia).**

<b>Proceso</b>	<b>Período</b>	<b>Efecto del déficit hídrico</b>	<b>Sensibilidad al déficit hídrico</b>
Crecimiento vegetativo	Todo el año	Reducción del crecimiento. Efecto sobre la cosecha del año siguiente	Muy alta
Desarrollo de yemas florales	Febrero- Abril	Reducción del número de flores. Efecto sobre la cosecha del año	Muy alta
Floración	Mayo	Reduce la fecundación. Efecto sobre la cosecha del año	Muy alta
Cuajado de frutos	Mayo-Junio	Disminuye la cosecha actual	Moderada
Crecimiento fruto	Junio-Cosecha	Disminuye el tamaño del fruto. Efecto cosecha del año	Moderada
Acumulación de aceite	Julio- Noviembre	Disminuye el contenido en aceite del fruto	Moderada

#### **1.4 PROGRAMACION DEL RIEGO EN EL OLIVO**

El agua es un recurso natural escaso muy importante en las prácticas agrícolas. Aunque las superficies en riego a nivel mundial están en torno al 17% de la superficie agrícola total, éstas representan más del 40% de la producción mundial (Fereres y Evans, 2006). El aumento en la producción agrícola, por el uso del agua en la agricultura, ha hecho que la superficie regada mundial se haya duplicado en los últimos 50 años.

El incremento de la superficie de olivar bajo condiciones de riego que ha tenido lugar en las últimas tres o cuatro décadas, ha propiciado el desarrollo de trabajos de investigación para conocer las necesidades hídricas del olivo y su influencia en la producción (Fernández , 2014). Asimismo, estos trabajos realizados en zonas de cultivo de olivar, como la mediterránea, donde la climatología impone, con frecuencia, características de marcada aridez, la disponibilidad de agua para riego puede ser un factor limitante. Además la agricultura mediterránea está teniendo que hacer frente a una presión, cada vez mayor, para reducir el agua para riego y por ello es necesario mejorar la eficiencia del uso del agua por los cultivos. Estos trabajos han tratado de establecer las condiciones óptimas para el aporte hídrico mediante el riego (Fernández et al., 2006, Pérez-López et al., 2008; Moriana et al., 2012).

La programación del riego de los frutales se suele realizar en base a la estimación de la evapotranspiración del cultivo, teniendo en consideración los valores de coeficiente de cultivo y el coeficiente reductor (Feres y Goldhamer, 1990). En olivo, recientemente, se ha desarrollado un modelo específico, que permite integrar en el coeficiente de cultivo, tanto el tamaño de la planta como la evaporación, lo que permite una mejora considerable de la estimación de las necesidades de agua (Orgaz et al., 2006). Este modelo está ajustado al manejo del agua en condiciones de ausencia de estrés hídrico. Sin embargo, cada vez son más frecuentes las restricciones de agua para el riego, especialmente para cultivos como el olivar, que debido a su capacidad de resistencia suele tener las menores dotaciones disponibles. Esto ha supuesto la obligación de realizar riegos deficitarios, es decir, por debajo de las necesidades teóricas del cultivo. En estas condiciones, las estimaciones de las necesidades de riego en base a balance de agua o modelos de cultivo no son válidas. De aquí, que la percepción de los agricultores, que habitualmente riegan con dotaciones de agua muy deficitarias, sea que el modelo de Orgaz et al. (2006), que suele estar incluido en herramientas muy populares de manejo del riego, sobreestime las necesidades de riego.

#### **1.4.1 EL RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO (RDC)**

El riego deficitario controlado es una técnica de programación que se desarrolló en la década de los 70 (Chalmers et al., 1985). Estos sistemas de programación del riego se basan en la existencia de estados fenológicos de la planta más resistentes a las condiciones de estrés hídrico, en los cuales se aplica una reducción del agua a aportar según un porcentaje de la evapotranspiración del cultivo (Behboudian y Mills, 1997). Estas estrategias han provocado resultados contradictorios, las recomendaciones de un RDC puede producir claras diferencias

cuando se realizan en plantaciones situadas en otra localización con condiciones ambientales y de suelo diferentes (por ejemplo: Girona (2002) en melocotón; Johnstone et al. (2005) en tomate).

La programación del riego en olivar ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, estableciéndose, en la mayor parte de los trabajos, que la restricción del riego debe realizarse desde el comienzo del endurecimiento masivo del hueso (Goldhamer, 1999; Moriana et al., 2003; Iniesta et al., 2009) y evitándose condiciones de estrés hídrico, incluso moderadas, durante la fase de floración-cuajado (Moriana et al., 2003). Sin embargo, otros trabajos (Magliulo et al., 2003; Lavee et al., 2007; Tognetti et al., 2007) van en contra de esta recomendación tradicional y sugieren regar sólo a partir del comienzo del endurecimiento de hueso. La gran capacidad de deshidratación del cultivo y su resistencia al estrés hídrico (Moriana et al., 2002) podrían estar relacionadas con estos resultados contradictorios. Lavee et al. (2007) al dar su recomendación de riego reducido en olivar a partir de endurecimiento, matiza que es válida siempre que se asegure un buen estado hídrico durante la floración. Otro ejemplo, en olivar, que muestra la importancia del conocimiento del nivel de déficit hídrico en la planta es en la fase de acumulación de aceite. Lavee y Wonder (1991) describieron una disminución en la acumulación de aceite con un estrés severo durante la fase de acumulación, mientras que Lavee et al. (2007) sugieren que restricciones moderadas en este momento fomentan la acumulación. La fase de postcosecha no ha sido estudiada probablemente porque en las zonas más productoras de aceitunas es período de lluvias

La consideración a la hora de programar riegos deficitarios de hacerlo en base a un porcentaje de la evapotranspiración del cultivo supone una menor precisión a la hora de definir el nivel de estrés hídrico y su duración, ya que el suelo puede compensar, o no, esta restricción, y los niveles de estrés hídrico alcanzados por los árboles serán diferentes y en distinto momento, dependiendo de las condiciones climatológicas del año. Por lo tanto, el manejo preciso del nivel del estrés hídrico al que se somete la planta es muy importante para obtener resultados comparables en distintas condiciones (Behboudian et al., 2011).

En los últimos años se ha comenzado a sugerir diferentes medidas realizadas directamente en planta para programar el riego. La idea de este manejo es regar en función de un determinado umbral de déficit hídrico, de manera que se ajusta el agua aplicada para mantenerse entorno a este umbral. En este sentido uno de los primeros trabajos fue el de Shackel et al. (1997) en diferentes cultivos y empleando el potencial hídrico. A partir de la década de los 90, comenzó a desarrollarse, en trabajos de investigación, una gran cantidad de

sensores que permiten un control automatizado del sistema suelo-agua-planta (Cohen, 1992). Algunos de estos sistemas se están sugiriendo como herramientas para la programación de riego de frutales, especialmente los sensores de flujo de savia y los de variación del diámetro del tronco (Ortuño et al., 2010).

#### **1.4.2 UTILIZACIÓN DE LAS VARIACIONES MICROMÉTRICAS DEL DIÁMETRO DEL TRONCO PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO.**

Con el desarrollo de los sensores y adquirentes de datos automáticos de los años 90 se reanudó el interés por los indicadores de la variación del diámetro del tronco (VDT) para la programación del riego. Son varios los trabajos publicados donde se usan estos indicadores como respuesta de los árboles frutales a las necesidades hídricas e incluso para la programación del riego (por ejemplo, "PepistaSystem", Huguet et al., 1992).

El parámetro más común de las curvas diarias de la VDT es la máxima contracción diaria (MCD) por ser el que antes detecta el estrés hídrico en la mayoría de los frutales, (Ortuño et al. 2010). Los primeros trabajos describen un incremento de la MCD comparado con árboles regados en condiciones no limitantes de agua, como un indicador del inicio del estrés de hídrico (Klepper et al., 1971). Sin embargo, el aumento de MCD también está relacionada con la demanda evaporativa (Herzog et al., 1995) que se comporta como una interferencia, reduciendo su utilización en programación de riegos en plantaciones comerciales. Para disminuir este problema, Goldhamer y Fereres (2001) propusieron el uso de la señal MCD: relación entre la MCD medida y la MCD de referencia medida en árboles regados en condiciones no limitantes de agua en el suelo. El uso de estos árboles de referencia supone un grado mayor de dificultad para el uso de estos indicadores en explotaciones comerciales. Como alternativa se emplean las líneas de base, donde la MCD se relaciona con una variable meteorológica, como la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), déficit de presión de vapor (VPD) o temperatura (Ortuño et al., 2010; Fernández y Cuevas. 2010). La estimación de la ecuación de la línea base debe ser anterior al comienzo de la programación. Goldhamer y Fereres (2004) en almendro, posiblemente en el primer trabajo que basa la programación de riego deficitario en esta metodología, realiza una estimación de la línea base estacional con los primeros datos de la estación de riego. Este cálculo sería sencillo para la MCD ya que se trata de un indicador de medida continua por lo que el número de datos es elevado.

Las líneas base MCD en olivo han sido estimadas en función de diferentes parámetros (temperatura, DPV) y se ha sugerido la existencia de variaciones según la carga de fruta y el momento de la estación en la que se estime (Moriana y Fereres, 2004; Moreno et al., 2006; Moriana et al., 2011). Corell et al. (2013) comparó en olivo diferentes posibilidades de estimación de la línea base para su uso en programación de riegos concluyendo que podría ser de utilidad el uso de los primeros datos obtenidos pero empleando la misma pendiente obtenida en la ecuación de Moriana et al. (2011) función de la temperatura máxima.

El uso de esta línea base en la programación de riegos del olivar podría, teóricamente, disminuir la falta de sensibilidad de la MCD en condiciones de estrés moderado, lo que más arriba se ha descrito como “*zona de incertidumbre*”. El efecto ambiental debería estar compensado con el uso de esta ecuación y todos aquellos valores de la señal MCD superiores a 1 serían indicadores de condiciones de estrés hídrico.

Las limitaciones de la utilidad de la MCD han provocado que se consideren otros indicadores como la tasa de crecimiento del tronco (TCT) para la programación del riego del olivar (Moriana et al., 2013). Este indicador no es habitualmente empleado en otros frutales porque está claramente afectado por la carga de fruto. En el caso del olivo se distinguen dos fases claramente diferenciadas. Antes del periodo de endurecimiento de hueso hay un incremento continuo del diámetro máximo del tronco con valores de TCT positivos y altos (Moriana et al., 2003) que en olivares jóvenes se han relacionado con variaciones de temperatura (Pérez-López et al., 2008). Durante el periodo del endurecimiento del hueso en árboles adultos con una carga de fruta significativa este crecimiento se detiene dando valores alrededor de 0 en ausencia de estrés hídrico (Moriana et al., 2003). Por el contrario, en años de muy baja carga, el periodo de endurecimiento es de crecimiento continuo en ausencia de restricciones hídricas (Moriana et al., 2003). Sin embargo la TCT en olivos regados en condiciones no limitantes de agua registran valores muy variables e incluso negativos durante la fase de endurecimiento en condiciones de carga elevada (Moriana et al., 2013). Moriana et al. (2013) sugiere que valores de media TCT durante el endurecimiento masivo del hueso superiores a  $-5 \mu\text{m día}^{-1}$  serían un umbral que indicaría condiciones en ausencia de estrés hídrico en olivares en carga y un estrés hídrico sostenible en olivares en descarga. Sin embargo, esta recomendación de un valor medio en un periodo de tiempo hace compleja la programación del riego. La gran oscilación de los valores TCT diarios sugieren que debe existir un componente ambiental que no se ha descrito en olivares adultos. Esta relación de la TCT en ausencia de estrés hídrico con el ambiente sería clave para el uso de este indicador en programación de riego.

## 2 OBJETIVOS

La programación del riego en función de medidas realizadas en la planta supone la necesidad de información sobre la respuesta fisiológica del cultivo a las condiciones de estrés hídrico. El conocimiento de este tipo de respuesta dará la información básica para establecer los umbrales precisos y evaluar la aptitud de los parámetros a considerar. Es precisamente la ausencia de umbrales lo que más limita el uso de estas medidas en la programación del riego en plantaciones “comerciales”.

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de las relaciones hídricas en olivos de aceituna de mesa para la programación del riego basada en medidas directas en planta. Para ello, se han establecido tres objetivos parciales.

Describir la respuesta fisiológica de olivos de aceituna de mesa, en condiciones de estrés hídrico moderado, como paso previo para proporcionar unos valores o indicadores más ajustados de potencial hídrico y establecer unos umbrales para su utilización en la programación del riego.

Examinar la respuesta de los parámetros máxima contracción diaria (MCD) y tasa de crecimiento del tronco (TCT) en condiciones de estrés hídrico como indicadores para la programación del riego. En primer lugar, valorando las mejoras de la *señal* MCD calculada a través de la aproximación de una línea base que determina la MCD de referencia; y en segundo lugar, estudiar la influencia de distintas variables meteorológicas en la TCT.

Mediante la información recabada y en combinación con los resultados de trabajos previos, obtener una aproximación a la programación de riego deficitario usando solamente valores umbrales de MCD y TCT sin árboles de referencia. Este objetivo se abordará desde dos puntos de vista. Primero, considerando la facilidad de interpretación de estos datos. Segundo, estudiando la robustez de las relaciones entre estos indicadores y los procesos relacionados con el resultado final de la cosecha, tales como la caída o tamaño de fruto.



### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se articula en tres capítulos diferentes en los que se abordan cuestiones relacionadas con la programación del riego y las relaciones hídricas en olivar de mesa. En cada uno de los capítulos se describen tres experimentos distintos. No obstante, todos ellos han sido realizados en la misma parcela experimental a lo largo de más de 6 años. El cuerpo principal de la tesis (capítulos 1 y 3) se desarrollaron desde los años 2011 al 2013, ambos incluidos, mientras que los resultados descritos en el capítulo 2 corresponden a una recopilación de los datos de estos tres años más otros obtenidos desde el año 2008 hasta el 2014. Para evitar duplicidades y dar una imagen más clara del conjunto se presenta en el presente apartado los materiales y métodos de los tres capítulos.

#### 3.1 ZONA DE ESTUDIO

El trabajo se ha desarrollado en la finca experimental "La Hampa" perteneciente al Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC) que se encuentra localizada en el término municipal de Coria del Río (37° 1' N, 6° 3' W; altitud 30 m), a unos 15 Km al suroeste de Sevilla (Foto 1).





**Foto 1.** Vista aérea de la localización de la finca experimental “La Hampa”, a la que se accede desde Sevilla por la A-3122 dirección Coria del Río. En la imagen inferior vista ampliada de la situación de la parcela experimental (en rojo).

### 3.2 SUELO.

La finca se encuentra situada en una zona ondulada, perteneciente al Mioceno de El Aljarafe, presentando el suelo de la parcela una pendiente comprendida entre el 3 y el 6 %. La profundidad del suelo varía entre 1 y 2 m, viéndose limitada por el material original, que está constituido por areniscas calizas. Según la SoilTaxonomy (USDA, 1975), el suelo se clasifica como Xerocept. Su clasificación edafológica completa puede verse en Moreno et al., (1983).

El suelo de la plantación es de textura franco arenosa. La composición granulométrica del suelo se realizó al comienzo del estudio de acuerdo con el procedimiento descrito por Gee y Bauder (1986) para lo cual se tomaron muestras a distintas profundidades, desde 0 hasta 0,9 m de profundidad, en tres puntos de la parcela experimental. Las muestras se disgregaron, se tamizaron (2 mm) y se dispersaron empleando hexametáfosfato sódico como agente dispersante. Las fracciones de arena gruesa (2-0.2 mm) y fina (0.2 mm-50  $\mu\text{m}$ ) se determinaron por tamizado en húmedo y posterior pesada. Las fracciones de limo (50-2  $\mu\text{m}$ ) y arcilla (< 2  $\mu\text{m}$ ) se determinaron por las lecturas obtenidas con un hidrómetro de Bouyoucos. Los resultados se encuentran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características texturales del suelo de la parcela experimental. Cada valor es la media de tres medidas acompañadas del error estándar.

Profundidad (m)	Arena gruesa (%)	Arena fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
<b>0 - 0,3</b>	75,1 ±4,2	3,6 ±1,8	6,7 ±1,8	14,6 ±1,7
<b>0,3 - 0,6</b>	72,8 ±0,8	5,2 ±0,9	7,2 ±0,2	14,8 ±1,6
<b>0,6 - 0,8</b>	71,4 ±4,4	5,7 ±0,7	6,4 ±1,6	16,5 ±2,5
<b>0,8 - 0,9</b>	74,6 ±5,4	4,2 ±1,4	7,8 ±3,6	13,4 ±1,7

La determinación de la densidad aparente se llevó a cabo mediante el método propuesto por Henin et al. (1972), tomando muestras superficiales de suelo inalteradas con cilindros de acero inoxidable de 8 cm de diámetro y 4 cm de altura, con un volumen de 201 cm<sup>3</sup>. Los cilindros fueron desecados en estufa a 105 °C durante 24 h y pesados posteriormente. El cálculo se realiza relacionando el contenido de agua determinado gravimétricamente con el volumen de los cilindros. La densidad aparente media en los primeros centímetros es de 1,30 g cm<sup>-3</sup> y entre 0,1 y 0,2 m de 1,50 g cm<sup>-3</sup>. El contenido volumétrico de agua a capacidad de campo es de 0,33 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> y 0,1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para el punto de marchitez permanente (-1,5 MPa). Palomo et al., (1999) encontraron que la conductividad hidráulica en un rango cercano a saturación es 0,01- 0,03 mm s<sup>-1</sup> en la superficie del suelo y 0,007 - 0,015 mm s<sup>-1</sup> en la suela de labor, a unos 0,2 m de profundidad.

El contenido de materia orgánica se determinó siguiendo el método de Walkley y Black (1934), consistente en la oxidación de la muestra con dicromato potásico en medio ácido, y posterior valoración del exceso de dicromato con sal de Mohr (disolución 0,5 N de sulfato ferroso-amónico). El P disponible se determinó por el método de Olsen et al. (1954), extrayendo el P con una disolución de bicarbonato sódico a pH 8,5 y determinando el P en autoanalizador y el K disponible se realizó según el método de Bowen et al. (1952), extrayendo el K con una disolución de acetato amónico a pH 7 y determinando el K en autoanalizador.

Los resultados obtenidos mostraron que se trata de un suelo pobre en materia orgánica (0,6 %), y presenta contenidos de fósforo (10 mg kg<sup>-1</sup>) y potasio (185 mg kg<sup>-1</sup>) normales para la zona.

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LA PARCELA EXPERIMENTAL.

Dentro de esta finca se eligió una parcela de olivar de la variedad 'Manzanilla de Sevilla' de 0,5 ha, con árboles de 42 años de edad. El marco de plantación es de 7 x 5 m y los árboles están formados a un pie con dos ramas principales a 0,8-1,5 m de la superficie del suelo. La plantación ha sido habitualmente regada por goteo. Solamente en uno de los apartados del Capítulo 2 se han empleado resultados obtenidos en una parcela contigua, de la misma edad y variedad pero a un marco de 7 x 7 m. A no ser que se indique lo contrario los datos y experimentos descritos estarán referidos a la parcela 7 x 5 m.

El agua que se emplea para el riego procede de un pozo situado en la misma finca, y tiene una conductividad eléctrica de 2,45 dS m<sup>-1</sup>, por lo que presenta un problema de salinidad moderado; el contenido medio de cloruro es de 468 g m<sup>-3</sup> lo cual provocaría problemas de toxicidad en caso de riego superficial o por aspersión, aunque si permite su uso para el riego por goteo.

El agua de riego es bombeada desde el pozo a 8 depósitos de 2000 litros cada uno situados junto al cabezal de riego, el cual se encuentra en una caseta. Dicho cabezal consta de los siguientes elementos:

- Un equipo de bombeo formado por una bomba de 1,5 CV de potencia.
- Un equipo de fertirrigación compuesto por un depósito de 1500 L de capacidad, con bomba agitadora y bomba inyectora.
- Un depósito de 4000 L para el almacenamiento del fertilizante líquido.
- Un equipo de filtrado compuesto por un filtro de anillas, un manómetro antes y después del filtro, y un sistema de tuberías y válvulas de accionamiento manual para el limpiado por inversión de flujo.
- Un regulador de presión, ajustado a 3 kg cm<sup>-2</sup>.
- Un programador de riego (Progres S.A., mod. Agronic 4000), que permite el control automático de los sectores de riego.

Del cabezal de riego parten las tuberías que riegan los diferentes sectores de riego. Al principio de cada una de ellas encontramos un contador y una electroválvula, gobernada por el programador de riego Agronic modelo 4000 (Progress, Lérida, España). El programador está conectado a un ordenador al que se puede acceder mediante Internet para programar el riego en remoto. Con esta disposición y mediante la lectura de los contadores, se puede verificar el correcto funcionamiento del sistema en cada sector.

La parcela se ha tratado de manejar con las prácticas habituales que se utilizan en plantaciones de olivar 'Manzanilla de Sevilla' de la comarca de El Aljarafe, de modo que nuestra parcela experimental resultase representativa de las parcelas comerciales de la zona. Solamente en el invierno del año 2012 a 2013 no se realizó ninguna poda.

### 3.4 CLIMA.

La temperatura media anual es de 17,5° C. Según la clasificación climática de Thornthwaite el clima se denomina Mesotérmico-seco-subhúmedo. Según la SoilTaxonomy, el régimen de humedad del suelo es Xérico, y el régimen de temperaturas es Térmico.

Los datos pluviométricos indican que, para la zona, el periodo más seco es de junio a septiembre, recogándose las precipitaciones más bajas en julio y agosto. La época húmeda se extiende de mediados-finales de septiembre hasta abril-mayo; el resto del año es cálido y seco. El valor medio de evapotranspiración potencial (ET<sub>o</sub>, mm) calculado con medidas hechas en "La Hampa" es de 1161,9 mm año<sup>-1</sup> y una pluviometría media de 505,5 mm (media de 1971-2014).

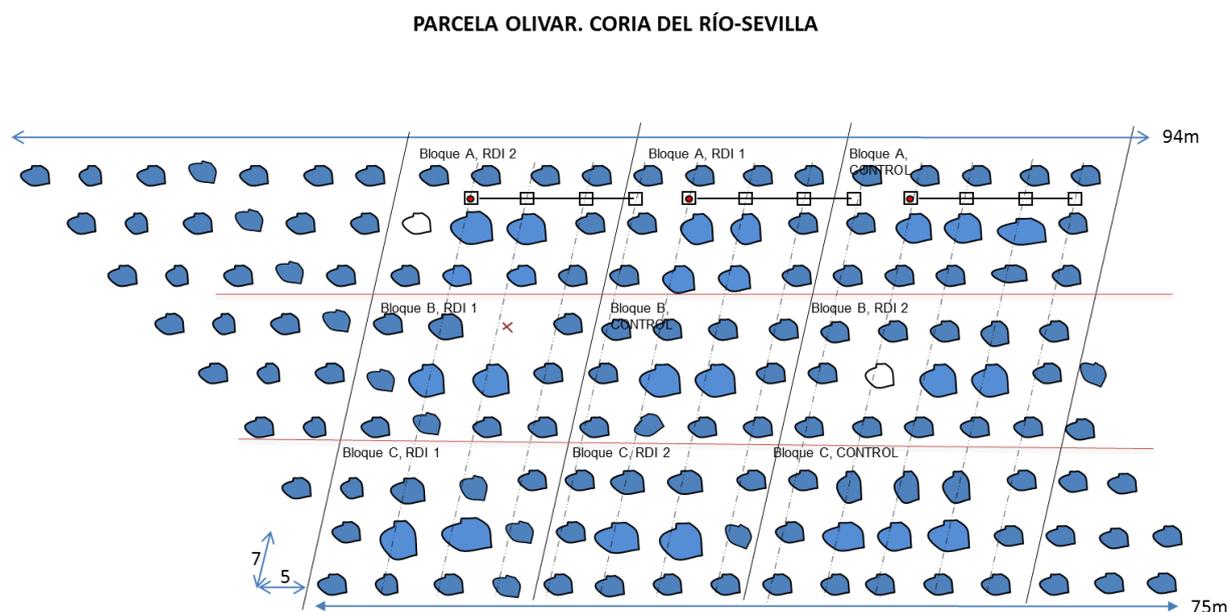
### 3.5 VARIABLES METEOROLÓGICAS.

La finca dispone de una estación meteorológica estándar del Instituto Nacional de Meteorología y de una estación agroclimática automática modelo Campbell (Campbell Scientific Ltd, UK), a unos 50 m del olivar experimental. Ambas estaciones se encuentran sobre una superficie de unos 350 m<sup>2</sup> metros cuadrados de grama (*Cynodon dactylon*). La estación estándar dispone de un termohigrógrafo, un termómetro de bulbo seco y otro de bulbo húmedo, un evaporímetro Piché y un pluviómetro. Para este trabajo se han empleado principalmente los datos de la estación agroclimática automática, que registra cada 30 minutos, los valores medios, máximos y mínimos de las siguientes variables: temperatura (T, °C) y humedad relativa del aire (HR, %), radiación solar global (R<sub>sg</sub>, W·m<sup>-2</sup>), radiación fotosintéticamente activa (PAR, μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), radiación difusa (PAR<sub>dif</sub>, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), radiación neta (R<sub>n</sub>, W·m<sup>-2</sup>), velocidad (u, m s<sup>-1</sup>) y dirección (d, grados) del viento y precipitación (P, mm). De esta última variable se registran los valores cada 10 minutos. Además de medir estas variables, la estación calcula las siguientes: presión de vapor a saturación (P<sub>sat</sub>, kPa) y déficit de presión de vapor del aire (DPV o D<sub>a</sub>, kPa), temperatura de punto de rocío (T<sub>d</sub>, °C) y radiación acumulada total (R<sub>acum</sub>, MJ m<sup>-2</sup> día).

### 3.6 TRATAMIENTOS DE RIEGO

#### *Diseño experimental*

El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con tres bloques por tratamiento para los datos descritos en el capítulo 1 y 3 del presente trabajo. Los bloques se realizaron en sentido perpendicular a la pendiente del terreno, sorteando la disposición de los tratamientos dentro de cada bloque (Fig 1). El periodo de riego comenzó y finalizó en diferentes fechas según el año. Los tratamientos deficitarios se iniciaron cuando la medida considerada para la programación alcanzaba el umbral necesario. En los árboles Control estas fechas se ajustaron según las lluvias primaverales en 2011 del 9 de Mayo al 13 de Septiembre, en 2012 del 20 de marzo hasta el 12 de septiembre y en 2013 del 16 de Mayo al 18 de Septiembre. La aplicación de agua se llevó a cabo mediante una línea portagoteros por fila de árboles, con cinco goteros de 8 L h<sup>-1</sup> por árbol, con 1 m de separación entre ellos, quedando el gotero central junto al tronco del árbol.



**Figura 2.** Esquema de la distribución de bloques al azar de la parcela experimental de olivos variedad 'Manzanilla de Sevilla' en el marco 7x5 m.

#### *Fenología del cultivo*

Los tratamientos de riego deficitario fueron diseñados de acuerdo al estado fenológico de los árboles. Los estados fenológicos considerados fueron los sugeridos por Goldhamer (1999) y Rallo (1997):

**Fase I.** Desde el comienzo de la brotación hasta el comienzo del endurecimiento masivo del hueso. En esta fase tiene lugar el periodo de plena floración y se ha descrito como muy sensible a la falta de agua en el suelo (Moriana et al., 2003).

**Fase II.** Desde el comienzo del endurecimiento masivo del hueso hasta el comienzo de la acumulación de aceite. Esta fase se ha descrito como la más resistente a la falta de agua en el suelo (Goldhamer, 1999). El comienzo del endurecimiento masivo del hueso se determinó siguiendo la metodología sugerida por Rapoport et al. (2013). Brevemente este trabajo describe que la disminución en la tasa de crecimiento longitudinal del fruto se inicia a la vez que el comienzo del endurecimiento masivo del hueso, entendiendo éste como una rápida subida en la tasa de esclerificación y por lo tanto de la dureza del hueso.

**Fase III.** Desde el comienzo de la acumulación de aceite hasta cosecha. Esta fase se ha descrito como moderadamente sensible al estrés hídrico, incluso se ha sugerido que un estrés bajo podría fomentar una mayor acumulación de aceite (Moriana et al., 2003; Lavee et al., 2007). No hay hasta el momento un marcador que indique el comienzo de este periodo. Distintos trabajos sugieren que la acumulación de aceite puede ser simultánea al endurecimiento masivo (Gómez del Campo, 2011; Fernández, 2014). Sin embargo, teniendo en cuenta que la variedad empleada es de mesa para procesamiento en verde este periodo se consideró que comenzaba en la última semana de Agosto y se empleó para la rehidratación de los árboles. La cosecha tuvo lugar alrededor de mediados de Septiembre.

#### *Manejo de los parámetros derivados de las curvas diarias de fluctuación del diámetro del tronco*

La fluctuación del diámetro del tronco son ciclos diarios de expansión y contracción. Los ciclos no tienen una utilidad directa para monitorizar el estado hídrico de la planta y deben obtenerse parámetros que definan las curvas diarias. Los parámetros seleccionados son la máxima contracción diaria (MCD) y la tasa de crecimiento del tronco (TCT). La MCD es la diferencia entre el máximo y el mínimo diario (Klepper et al., 1971). La tasa de crecimiento del tronco (TCT) del día “n” se define como la diferencia entre el máximo diario del día “n+1” menos el día “n” (Cuevas et al., 2010).

La MCD es un parámetro muy relacionado con la transpiración de la planta (Herzog et al., 1995) y por lo tanto con la demanda evaporativa lo que dificulta su uso en programación de

riegos. Goldhamer y Fereres (2001) sugieren el uso de líneas base que relacionen alguna variable meteorológica sencilla con la MCD en ausencia de estrés hídrico, de esta manera es posible estimar el valor que tendría esta variable en función de la demanda evaporativa. El presente trabajo empleó la temperatura máxima diaria para obtener la línea base que es una de las variables sugeridas en olivar (Moriana et al., 2011). Una forma sencilla de estimar el estado hídrico de la planta es con el cálculo de la *señal* MCD (Goldhamer y Fereres, 2001) que es el ratio entre la MCD medida y la esperada. En la mayor parte de los frutales, valores superiores a 1 en la *señal* MCD son indicadores de estrés hídrico (Ortuño et al., 2010) ya que supone que el tronco contrae más de lo esperado para una determinadas condiciones de demanda evaporativa. La estimación de la línea base se obtuvo según la metodología descrita por Corell et al. (2013). Brevemente, Corell et al. (2013) emplea los datos de MCD y temperatura máxima del final de la Fase I de cultivo en ausencia de estrés hídrico para estimar la línea base estacional, asumiendo que las ecuaciones estimadas son paralelas a línea base sugerida por Moriana et al. (2011).

El comportamiento de la MCD en olivar es, como ya se ha comentado, significativamente diferente de otras especies y no es habitual encontrar valores superiores a los tratamientos Control en plantas estresadas. Por esta razón, se asumió el uso de este indicador para definir condiciones severas de estrés hídrico. De acuerdo a la relación MCD vs potencial hídrico (Moriana et al., 2000) esto supondría valores *menores* de los árboles estresados que de los árboles control y, por lo tanto, valores de la *señal* MCD inferiores a 1.

La TCT es un parámetro precoz en la detección del estrés hídrico en olivar (Moriana y Fereres, 2002). Su evolución estacional está muy marcada por la presencia de fruto en arboles adultos. En años de carga significativa se registran valores positivos (crecimiento continuo) en ausencia de estrés hídrico hasta que comienza el endurecimiento del hueso y los valores están alrededor de 0 (Moriana et al., 2003). Por el contrario, en los años de descarga este periodo de ausencia de crecimiento no tiene lugar (Moriana et al., 2003). No se han encontrado relaciones claras entre la TCT y variables meteorológicas por lo que los valores umbrales sugeridos son absolutos y no dependientes de las condiciones ambientales, de acuerdo con experiencias anteriores.

### *Descripción de tratamientos*

La nomenclatura de los tratamientos es la misma en los tres capítulos del presente trabajo. En el capítulo 1 solamente se emplearon árboles de los tratamientos Control y RDC-12 (riego deficitario controlado-12) en el año 2012. En el capítulo 2 se usa el tratamiento Control, desde el

año 2008 hasta el 2014, para obtener una relación entre la tasa de crecimiento del tronco y las variables climáticas, y por otro lado, los tres tratamientos descritos, durante el período de 2011 hasta 2013, para el estudio de la *señal* y la contracción máxima diaria. Los árboles empleados en este caso, fueron diferentes entre años aunque el tratamiento de riego fue el descrito más abajo en todos los casos. Finalmente el capítulo 3 emplea los tres tratamientos descritos entre los años 2011 al 2013.

**Tratamiento Control.** Olivos regados al 100% de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) con el fin de no tener condiciones limitantes de agua durante todo el período de riego. La programación del riego y la aplicación de agua en este tratamiento fueron diarias sin tener en cuenta el agua del suelo. El cálculo de la  $ET_c$  se realizó con el producto de la  $ET_o$  (calculada según Penman-Montheith con los datos de la estación meteorológica) y los coeficientes de cultivo estimados para las condiciones de la finca por Fernández et al. (2006):

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \cdot K_r$$

Donde  $ET_o$  es la evapotranspiración potencial, calculada según Penman-Montheith con los datos de la estación meteorológica,  $K_c$  y  $K_r$ , son el coeficiente de cultivo y coeficiente de reducción respectivamente, estimados para las condiciones de la finca por Fernández et al. (2006).  $K_c$  expresa la relación entre la evapotranspiración de un cultivo determinado y la del cultivo de referencia en la estación meteorológica, y  $K_r$  es un coeficiente de reducción que depende del porcentaje de cobertura del suelo de la parcela por parte del cultivo, de modo que varía entre un poco más de 0 para un olivar recién plantado, y 1 para un olivar adulto que cubre más del 80 % del suelo.

Solamente durante el año 2014 la programación del riego se hizo en función de potenciales hídricos con los umbrales de -1.2 MPa en fase I y -1.4 MPa en fase II y fase III sugeridos por Moriana et al., (2012).

**Tratamiento de riego deficitario controlado-2 (RDC-2).** La finalidad de este tratamiento fue crear un estrés hídrico moderado durante la fase del endurecimiento del hueso, y posteriormente, una lenta recuperación. La programación del riego se realizó teniendo en cuenta la contracción máxima diaria y la tasa del crecimiento del tronco, condicionado según las tres primeras fases del estado fenológico. En ningún caso se consideró la carga de fruta de los árboles.

Durante la fase I, el objetivo fue realizar un riego sin condiciones de estrés hídrico. En esta fase el riego se realizó solamente en aquellos días en los que la TCT fue menor de  $20 \mu\text{m día}^{-1}$ , valor obtenido de los trabajos previos publicados en Moriana et al. (2013).

Durante la fase II, endurecimiento del hueso, la finalidad fue crear un estrés hídrico moderado. El riego se aplicó sólo en aquellos días en los que la *señal* de MCD fue menor de 0.9.

Durante la fase III, se planteó una rehidratación lenta. El riego se realizó solamente cuando la TCT fue menor de  $-5 \mu\text{m día}^{-1}$ .

***Tratamiento de riego deficitario controlado-12 (RDC-12)***. La finalidad de este tratamiento fue crear un estrés hídrico moderado antes de la fase del endurecimiento del hueso, un estrés hídrico severo durante el endurecimiento del hueso y, posteriormente, una lenta recuperación. Al igual que el tratamiento RDC-2, la programación del riego se decidió según unos umbrales de MCD y TCT en función del estado fenológico. En ningún caso se tuvo en cuenta la carga de fruta de los árboles.

Durante la fase I, el objetivo fue crear un estrés hídrico moderado. El riego se realizó solamente en aquellos días en los que la TCT fue menor de  $10 \mu\text{m día}^{-1}$ . Este valor es la mitad del obtenido en los trabajos previos publicados en condiciones de ausencia de estrés hídrico en Moriana et al. (2013).

Durante la fase II, endurecimiento del hueso, se planteó alcanzar condiciones de estrés hídrico severo. El riego se realizó sólo en aquellos días en los que la *señal* MCD fue menor de 0.75.

Durante la fase III, se planteó una rehidratación lenta, idéntica al tratamiento anterior. El riego se realizó solamente cuando la TCT fue menor de  $-5 \mu\text{m día}^{-1}$ .

Los resultados de los años 2011 y 2012 indicaron que los tratamientos RDC-2 y RDC-12 eran muy similares (ver apartado Resultados del Capítulo 3). Por esta razón solamente en el año 2013 se varió este protocolo. En ese año la fase II del tratamiento RDC-2 fue controlada con la TCT. Realizándose el riego cuando la  $TCT < -10 \mu\text{m día}^{-1}$ .

#### *Cálculo del agua a aplicar*

Los sensores de variación del diámetro del tronco permiten estimar niveles de estrés hídrico pero no dan información sobre la cantidad de agua a aplicar en cada evento de riego. El

algoritmo empleado ha sido el sugerido en los trabajos de Moriana et al. (2012 y 2013). El agua aplicada se obtiene según la distancia del parámetro considerado en la programación al umbral seleccionado. Al emplear en este trabajo un indicador continuo, la programación del riego se realizó de forma remota diariamente. Cuando la medida está por encima del umbral (no se ha logrado el nivel de estrés hídrico deseado) no se realiza ningún riego. Siempre que se haya sobrepasado el umbral se realiza un riego. La máxima cantidad de riego diario que se aporta es la evapotranspiración diaria máxima del cultivo en el año medio (en nuestro caso  $4 \text{ mm día}^{-1}$ ). Los valores empleados en este trabajo fueron:

- Si la distancia al umbral seleccionado es inferior al 15% se realiza un riego de 1 mm.
- Si la distancia al umbral seleccionado está entre 15-30% se realiza un riego de 2 mm.
- Si la distancia al umbral seleccionado es superior al 30% se realiza un riego de 4 mm.

### 3.7 MEDIDAS DEL AGUA EN EL SUELO.

Para determinar el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) en el perfil de suelo de 0 a 1 m de profundidad, se utilizó el método de “reflectometría en el dominio de frecuencia” (FDR), más conocido como método capacitivo, para lo cual se empleó una sonda capacitiva portátil, modelo ProfileProbe de la casa Delta-T Devices Ltd., UK, con tres tubos para su acceso, colocados en tres árboles de cada tratamiento instrumentados con dendrómetros. Los tubos estaban instalados a 1,5 m del tronco en la línea de riego entre dos goteros.

El método FDR, se basa en la relación existente entre el contenido volumétrico de agua y la constante dieléctrica aparente del medio. Dicha constante se determina a partir del tiempo de tránsito de una señal electromagnética a lo largo de una sonda metálica introducida en el suelo (Ferre y Topp, 2002).

Este tipo de sondas permiten la obtención de un registro de datos en continuo a lo largo de todo el perfil del suelo, ofreciendo medidas más o menos precisas pero que necesitan de una calibración previa, realizada en la misma parcela en años anteriores.

### **3.8 MEDIDAS EN PLANTA.**

Con objeto de realizar las distintas medidas en planta durante el período experimental, se seleccionaron y marcaron seis árboles en cada uno de los tres tratamientos hídricos. Además estos árboles fueron monitorizados con medidas en continuo de la variación del diámetro del tronco.

### **3.9 MEDIDAS DEL CRECIMIENTO DE RAMOS.**

Se seleccionaron diez ramos al azar, a una altura entre 1,4 y 1,8 m, en cada uno de los 6 árboles seleccionados de cada tratamiento; se marcaron de manera que pudiesen ser identificados y se midió el crecimiento medio del ramo del año ( $l$ , cm), periódicamente a lo largo del período experimental. Los datos de crecimiento se obtuvieron midiendo desde el lugar de inicio del crecimiento en el año del estudio (indicando por una marca de referencia), hasta el ápice del ramo.

### **3.10 NÚMERO DE INFLORESCENCIAS Y FRUTOS**

En los mismos diez ramos utilizados para la medida del crecimiento de ramos, se contabilizaron, desde el ápice hasta el inicio del ramo, el número de inflorescencias y posteriormente, a partir de endurecimiento, el número de frutos.

### **3.11 CRECIMIENTO DEL FRUTO Y COSECHA**

Se realizó un seguimiento del crecimiento del fruto durante todo el período experimental mediante la relación que existe entre los dos diámetros característicos y el volumen de un ovoide, para ello se midió el diámetro longitudinal y transversal en diez frutos elegidos al azar, de cada uno de los seis árboles seleccionados para realizar las medidas en cada tratamiento. La medida del diámetro longitudinal fue utilizada para determinar el momento del comienzo del endurecimiento masivo del hueso según Rapoport et al. (2013).

Rapoport et al. (2013) compara diversos parámetros del crecimiento del fruto durante su desarrollo. Uno de estos parámetros es la presión de rotura del hueso en el que se distinguen tres periodos bien diferenciados. El primero y el último con variaciones en la presión de rotura muy

pequeños y un periodo intermedio en el que se incrementa esta presión de forma muy rápida. Es este periodo el que se considera el de endurecimiento masivo del hueso y su inicio coincide con un cambio en el crecimiento del diámetro longitudinal de la aceituna (Rapoport et al., 2013).

La cosecha de toda la parcela experimental se realizó en torno a la mitad de septiembre, se pesó individualmente la producción de cada árbol instrumentado. Se tomaron muestras de la producción de cada uno de los seis árboles monitorizado para determinar el escandallo (número de frutos en 1 Kg de aceitunas), la relación pulpa hueso y el índice de madurez que son algunos de los parámetros de calidad por los que se rige el sector del aderezo para valorar el precio de la aceituna de mesa. Para la relación pulpa/hueso se deshuesaron 100 frutos por muestra, y se pesaron en fresco de forma separada, fruto y hueso. Posteriormente se metieron en una estufa a 70 °C para determinar la relación pulpa/hueso en seco. Para el índice de madurez se tomaron igualmente 100 frutos al azar de cada muestra y se clasificaron según las clases de color propuestas por Hermoso et al. (1995). El índice de madurez se determinó mediante la media ponderada de los cinco grupos descritos en la tabla 3.

**Tabla 3.** Descripción de las clases de aceitunas en función de su estado de madurez (Hermoso et al., 1995)

0	<b>Piel verde intensa</b>
1	Piel verde amarillenta
2	Piel verde con manchas rojizas en menos de la mitad del fruto. Inicio de envero
3	Piel rojiza o morada en más de la mitad del fruto. Final del envero
4	Piel negra.

### 3.12 MEDIDAS DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA

#### 3.12.1 POTENCIAL HÍDRICO

Tradicionalmente, el indicador más ampliamente utilizado para evaluar el estado hídrico de las plantas ha sido el potencial hídrico foliar ( $\Psi$ ) (Améglio et al., 1999; Hsiao, 1990), empleándose en algunos casos para programar el riego (Martin et al., 1991; Moriana et al., 2012).

El potencial hídrico no es siempre sensible al régimen de riego aplicado debido a la regulación estomática (Jones y Cumming, 1984). En este sentido, diversos autores han

demostrado que el potencial hídrico de hojas no transpirantes (potencial hídrico del xilema o tallo,  $\Psi_{tallo}$ ) es un indicador más sensible al estrés hídrico y por lo tanto, su medida es más fiable y adecuada para la programación del riego en cultivos leñosos (McCutchan y Shackel, 1992; Shackel et al., 1997; Naor, 2000; Choné et al., 2001).

Para la determinación del potencial hídrico de tronco ( $\Psi_{tallo}$ , MPa) se usó una cámara o bomba de presión (Model 1000, PMS, USA)(Foto 2) teniendo en cuenta las recomendaciones de Turner (1981).



**Foto 2.** Izquierda: cámara de presión. Derecha: detalle de medida del potencial hídrico.

La medida del potencial hídrico se llevó a cabo en hojas basales de ramos que crecían en el tronco y ramas principales, en 1 hoja por árbol y 6 árboles por tratamiento, los mismos en los que se tenían instalados los sensores. Se envolvieron 2 hojas por árbol con papel de aluminio para evitar la transpiración (Foto 3), unas 2 horas antes de la medida, tiempo suficiente para que su potencial se igualase con el del tronco. Las hojas seleccionadas estaban situadas en la cara interior y sombreadas para evitar la incidencia directa de la radiación. Las medidas se realizaron semanalmente durante la época de riego, midiéndose al mediodía.



**Foto 3. Hojas envueltas en aluminio.**

Con objeto de describir el efecto de los diferentes tratamientos hídricos se calculó la integral de estrés hídrico  $S_\psi$  a partir del potencial hídrico del tallo, mediante la ecuación definida por Myers, (1988):

$$S_\psi = |\sum(\psi_{tallos} - c)n|$$

Donde  $\psi_{tallos}$  es el potencial hídrico del tallo medio para un intervalo determinado,  $c$  es un valor de referencia, y  $n$  es el número de días del intervalo seleccionado. Tradicionalmente  $c$  ha sido el máximo valor medido en el periodo experimental. Sin embargo, la intención del cálculo de este parámetro era, también, su comparación con datos obtenidos anteriormente (los publicados en Dell'Amico et al., 2012). Por esta razón se dio a  $c$  el valor de -1.4 MPa que es la referencia sugerida por Moriana et al., (2012) para olivos en ausencia de estrés hídrico durante la fase de endurecimiento del hueso. Aquellos valores superiores a -1.4 se consideraron como iguales a este valor, debidos al efecto de la demanda evaporativa y que, por lo tanto, no suponían condiciones reales de estrés hídrico.

### 3.12.2 CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA EN HOJA

La conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se midió con un porómetro de balance nulo, modelo LiCor 1600 (Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA). El porómetro mide y controla el flujo de aire seco hacia la cámara de medida, de forma que contrarresta el flujo de vapor de agua desde la superficie de la hoja, manteniendo así un valor estable de humedad relativa en el interior de la cámara, y próximo al ambiental. Las medidas se realizaron en hojas del año plenamente desarrolladas, sanas, orientadas al sol y localizadas a una altura entre 1,4-1,8 m.

La conductancia estomática de la hoja en olivo tiene un ciclo diario característico, con un máximo a primera hora de la mañana para ir disminuyendo hasta alcanzar el mínimo diario que ocurre a partir de mediodía (Xiloyannis et al., 1988). En nuestras condiciones hemos estimado que el máximo corresponde aproximadamente a medidas realizadas alrededor de las 10:00 (hora local). Se realizaron dos medidas por árbol y 6 árboles por cada tratamiento.

### 3.13 RELACIONES HÍDRICAS DE LAS HOJAS Y DEL FRUTO.

Las determinaciones descritas en este apartado fueron empleadas solamente en la capítulo 1 que se realizó durante el año 2012. Para la determinación de las relaciones hídricas de la hoja y el fruto, se midió el potencial hídrico foliar y del fruto ( $\Psi_{\text{foliar}}$  y  $\Psi_{\text{fruto}}$ ), el potencial osmótico foliar y del fruto ( $\Psi_{\pi\text{ foliar}}$  y  $\Psi_{\pi\text{ fruto}}$ ) y el potencial osmótico a saturación en la hoja ( $^{100}\Psi_{\pi\text{ foliar}}$ ), además se determinó el potencial de turgencia tanto de la hoja como del fruto ( $\Psi_p\text{ foliar}$  y  $\Psi_p\text{ fruto}$ ). Estas determinaciones se realizaron a la vez que las medidas de conductancia estomática máxima.

Se seleccionaron dos hojas totalmente desarrolladas, bien iluminadas, a una altura de 1,4 a 1,8 m del suelo, en cada uno de los seis árboles en los que se realizaron las medidas de cada tratamiento (Control y RDC-12). Una de las dos hojas tomadas de cada árbol se utilizó para determinar el potencial hídrico foliar ( $\Psi_{\text{foliar}}$ ) con la cámara de presión (Model 1000, PMS, USA), el valor obtenido de  $\Psi_{\text{foliar}}$  se utilizó para calcular el potencial de turgencia de la hoja. Una vez medido el potencial hídrico, la hoja se envolvió en papel de aluminio e inmediatamente después se introdujo en nitrógeno líquido y se guardó a  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ , para la determinación de su potencial osmótico foliar ( $\Psi_{\pi\text{ foliar}}$ ). La segunda hoja se introdujo en un tubo con agua destilada, en el que sólo estaba en contacto con el agua el peciolo. El tubo de ensayo se envolvió en papel de aluminio y se introdujo en una nevera portátil hasta llegar al laboratorio donde se mantuvieron en oscuridad y entre  $6-8\text{ }^\circ\text{C}$  durante unas 24 horas. El

tiempo de rehidratación utilizado fue el necesario para conseguir que  $\Psi_{foliar}$  fuera prácticamente cero. Una vez pasado ese tiempo se sumergieron en nitrógeno líquido, se envolvieron individualmente en papel de aluminio y se almacenaron en un congelador a  $-80^{\circ}\text{C}$  hasta el momento de la medida de potencial osmótico de plena turgencia ( $^{100}\Psi_{\pi foliar}$ ). A la misma hora, en un fruto del mismo brote donde se habían tomado las hojas se midió el potencial hídrico ( $\Psi_{fruto}$ ) con la cámara de presión (Model 1000, PMS, USA). Una vez determinado el  $\Psi_{fruto}$  se envolvieron en papel de aluminio y se sumergieron en nitrógeno líquido almacenándose a  $-80^{\circ}\text{C}$ . Estas muestras se utilizaron para la determinación del potencial osmótico del fruto ( $\Psi_{\pi fruto}$ ).

Todas las muestras congeladas, tanto de hojas como de frutos, se sacaron, descongelaron y se equilibraron a  $20^{\circ}\text{C}$  durante 15 minutos antes de la determinación del potencial osmótico. En las muestras de hojas, antes de medir se eliminó el nervio central, inmediatamente después se utilizaron los tejidos par la determinación de  $\Psi_{\pi foliar}$ . En los frutos se extrajo el contenido celular por centrifugación a 10.000 rpm durante 3 minutos, para la determinación del  $\Psi_{\pi fruto}$ . La medida del potencial osmótico tanto de hojas como de fruto se realizó con un psicrómetro TRU PSI modelo WP3 calibrado frente a una solución salina.

Los valores del potencial de presión de turgencia ( $\Psi_p$ ), del fruto y de la hoja se calcularon mediante la ecuación:

$$\Psi_p = \Psi - \Psi_{\pi}$$

Donde  $\Psi_p$  es el potencial o presión de turgencia,  $\Psi$  es el potencial hídrico y  $\Psi_{\pi}$  es el potencial osmótico.

### 3.14 MEDIDA DE LAS VARIACIONES DEL DIÁMETRO DEL TRONCO MEDIANTE DENDRÓMETROS

Las variaciones del diámetro del tronco permiten una monitorización continua del estado hídrico del árbol. Esta medida se realizó con sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal, de alta precisión (siglas inglesas LVDT, SolartronMetrology, Bognor Regis, UK, modelo DF 2.5, precisión  $\pm 10$  micrómetros). Estos sensores son transductores de desplazamiento lineal (Foto 4). El LVDT pertenece a una familia de transductores que convierte el desplazamiento en un cambio de tensión continua, gracias a la alteración de las líneas de campo magnético entre dos o más arrollamientos, originadas por una tensión

continua aplicada a uno de los devanados. En el modelo descrito, el transductor consta de tres arrollamientos coaxiales, de los cuales el del centro es el primario y los situados en los extremos son los secundarios. Las amplitudes de las señales dependen del acoplamiento entre cada secundario y el primario y, por consiguiente, dependen de la posición del núcleo de hierro. En resumen, la tensión de salida es proporcional a la diferencia de acoplamiento mutuo entre el primario y cada uno de los secundarios. Como el acoplamiento es proporcional a la posición del vástago, también lo será la tensión de salida. Los tres arrollamientos se encuentran en un cilindro hueco de material no ferromagnético y aislado eléctricamente. El núcleo ferromagnético puede acoplarse a una amplia gama de vástagos. La carcasa es de metal ferromagnético con el fin de actuar de barrera frente a las interferencias electromagnéticas.



**Foto 4.** Bobina del dendrómetro y aguja colocado en un árbol experimental. El dendrómetro está sujeto por el portasensor que abraza el tronco. La aguja está pegada al tronco por una sustancia adherente inocua para el árbol.

Estos sensores deben estar provistos de anclajes al órgano a medir, evitando dañarlo e interferir en su desarrollo normal, aportando firmeza a la célula de medida (Foto 4 y 5). El portasensor (Foto 5) está construido con Invar (aleación de Ni y Fe), de coeficiente de dilatación térmica cercano a cero (Katerji et al., 1994), y aluminio (Requena Co., España, modelo R-150 mm). El contacto entre el extremo de la aguja y el órgano debe ser prácticamente perfecto, para lo que se puede usar una gran variedad de sustancias adherentes (Foto 4). Los sensores fueron colocados en todos los árboles en el tronco principal (Foto 5).

La señal que produce este sensor es recibida y almacenada en un adquisidor de datos programable (CR1000, Campbell Sci, Reino Unido) que se encuentra en el centro de la

parcela. Se realizan medidas cada 15 segundos con medias cada 15 minutos. Este almacenador de datos está conectado al mismo ordenador que el programador de riegos. Se puede acceder, por lo tanto, de forma remota a través de internet y descargarlos de forma diaria para comprobar si hay algún problema en la colocación.



**Foto 5. Portasensor colocado en un árbol experimental.**

Estos sensores dan lugar a ciclos diarios de contracción y expansión ya descritos anteriormente. Brevemente, a partir de estos ciclos diarios se calculan, normalmente, dos indicadores la máxima contracción diaria (MCD) y la tasa de crecimiento del tronco (TCT).

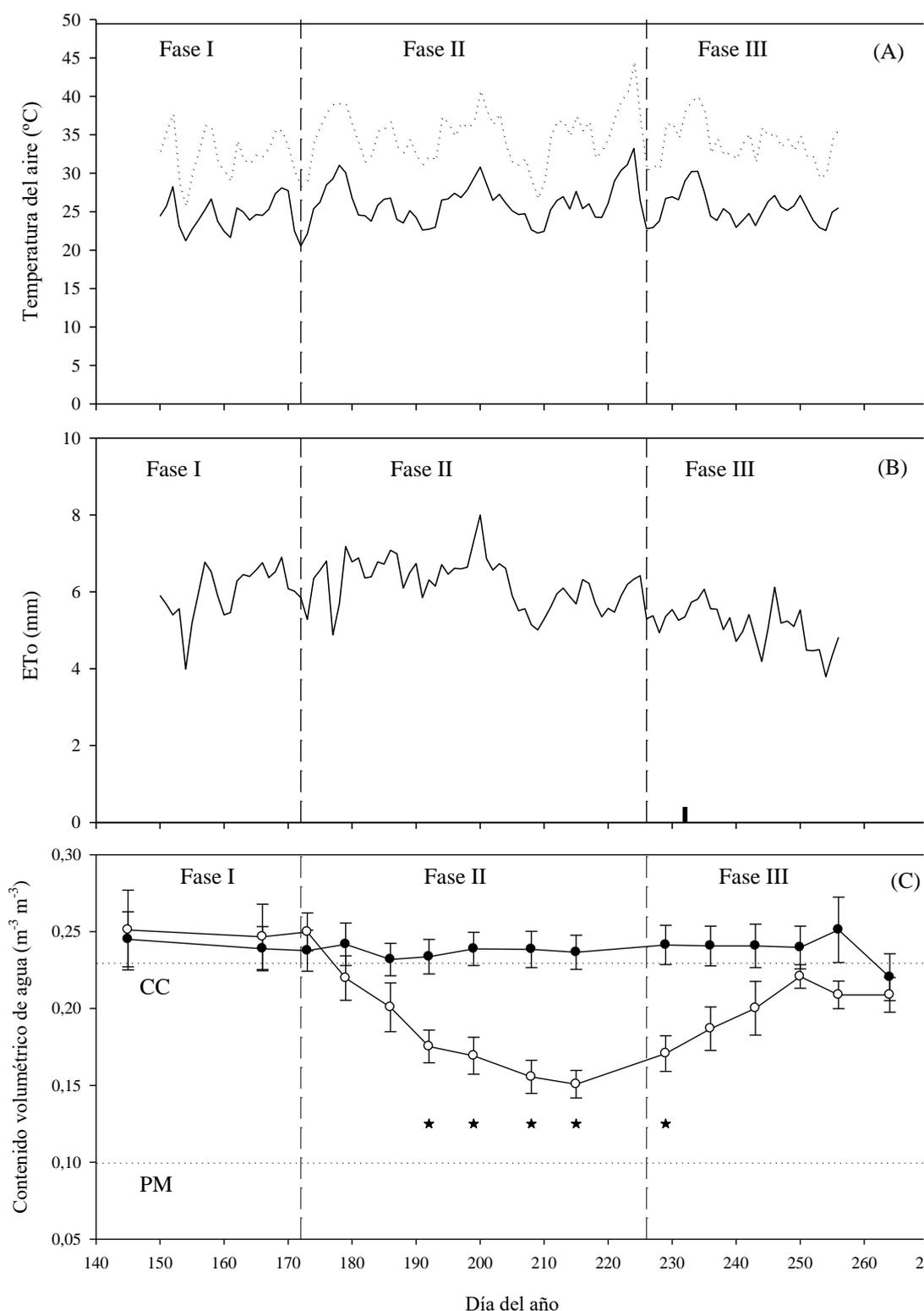


## 4 CAPITULO 1. CAMBIOS EN LA RESPUESTA FISIOLÓGICA ENTRE HOJAS Y FRUTOS DURANTE UN ESTRÉS HÍDRICO MODERADO.

### 4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1.1 RESULTADOS

El período experimental considerado en este trabajo se desarrolló desde el inicio de la fase II, fase de endurecimiento masivo del hueso, día 172, hasta la recolección de la aceituna, día 256. Como ya se indicó en materiales y métodos durante la fase II se realizó un Riego Deficitario Controlado (RDC) en uno de los tratamientos. Este periodo de déficit concluyó el día 226 comenzando lo que hemos denominado fase III o fase de rehidratación hasta cosecha. Durante el ensayo, las temperaturas medias diarias oscilaron desde los 20,5 °C del mes de junio a los 33,2 °C del mes de agosto (Figura 3A); registrándose en este último mes las temperaturas máximas más altas, con media de las máximas de 35,5 °C. El valor máximo de temperatura se alcanzó el día 224 con una temperatura de 44,6 °C (Figura 3A). La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) media durante los meses de junio y julio fue de 6,1 y 6,3 mm·día<sup>-1</sup> respectivamente, que fueron los períodos de mayor demanda evaporativa de la atmósfera, alcanzando un valor máximo de 8 mm·día<sup>-1</sup>, el día 200. En los meses siguientes comenzó a disminuir ligeramente, registrándose medias de 5,5 y 4,9 mm·día<sup>-1</sup> en los meses de agosto y septiembre, respectivamente (Figura 3B). La ET<sub>o</sub> acumulada durante el período experimental fue de 495 mm y hubo un solo registro pluviométrico de 0,5 mm, el día 232. El contenido volumétrico medio de agua en el perfil de suelo (0-1 m) a lo largo del período experimental se muestra en la Figura 3C, donde se puede observar como ambos tratamientos iniciaron dicho período con valores próximos a la capacidad de campo (0,23 m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>). En el caso del tratamiento Control, estos valores se mantuvieron prácticamente constantes durante todo el período experimental; mientras que en el tratamiento de Riego Deficitario Controlado (RDC) se produjo un claro descenso, encontrándose diferencias significativas desde el día 192, y llegándose a alcanzar valores en torno a 0,15 m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup> (día 215), registrados antes de la fase de recuperación hídrica, en la cual vuelven a aproximarse a los valores iniciales.

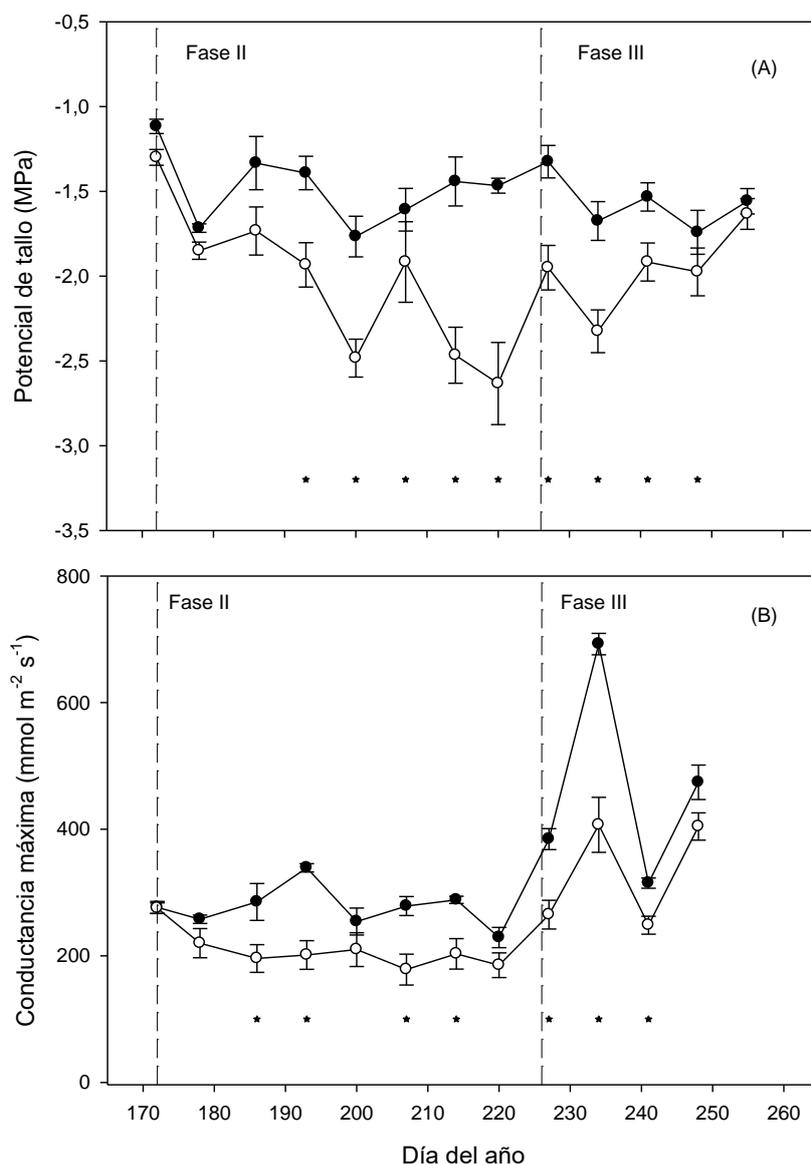


**Figura 3.**(A) Temperatura media ( $T_m$ , línea continua) y máxima ( $T_{max}$ , línea de puntos) del aire, (B) la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ , línea sólida) y precipitación diaria (barra) y (C) el contenido volumétrico medio de agua en el suelo de 0 a 1 metro de profundidad, en el tratamiento control (círculos negros) y RDC (círculos blancos). Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ( $p < 0.05$ , test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan el principio y fin del período de déficit y las líneas de puntos horizontales los valores de capacidad de campo (CC), y punto de marchitez (PM) del suelo en la parcela experimental.

La Figura 4 muestra la evolución del potencial hídrico del tallo al mediodía ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ) (A) y la conductancia máxima foliar ( $g_{\text{max}}$ ) (B) durante el período experimental. Los valores medios del  $\Psi_{\text{tallo}}$  en el tratamiento Control disminuyeron desde -1,12 MPa, al inicio de la fase II, hasta llegar a -1,77 MPa el día 200, a partir del cual, permaneció prácticamente constante hasta la recolección. La evolución de  $\Psi_{\text{tallo}}$  en el tratamiento RDC siguió un patrón similar al del tratamiento Control hasta el día 200, pero con descensos más acentuados lo que dio lugar a diferencias significativas desde el día 193, alcanzando valores mínimos alrededor de -2,6 MPa, el día 220 justo antes de la recuperación. La recuperación hídrica se manifestó rápidamente con un aumento del valor medio de  $\Psi_{\text{tallo}}$  del tratamiento RDC y continuó aumentando hasta igualarse a los valores del tratamiento Control el día 255, 28 días después del inicio de la fase de rehidratación.

Durante toda la fase del endurecimiento masivo del hueso, los valores medios de  $g_{\text{max}}$  (Figura 4B) medidos en el tratamiento Control, permanecieron constantes en torno a 275  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; a partir de la fase III se observó una rápida subida hasta alcanzar valores medios de 692,5  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , registrados el día 232, y un posterior descenso hasta llegar a 400  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  antes de la recolección. Los valores de  $g_{\text{max}}$  para el tratamiento RDC fueron más bajos que los del Control durante todo el período experimental, siendo esta disminución significativa desde el día 186 hasta el 248, con una tendencia descendente desde el inicio, 275  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , hasta justo antes de la fase de recuperación hídrica, 185  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Tras el inicio de la recuperación hídrica, los valores de  $g_{\text{max}}$  en el tratamiento RDC estuvieron en torno a 320  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , permaneciendo las diferencias entre tratamientos hasta justo antes del final de la recuperación.

La evolución del potencial hídrico foliar ( $\Psi_{\text{foliar}}$ ) (A), del fruto ( $\Psi_{\text{fruto}}$ ) (B) y la diferencia entre ellos (C), medidos a la hora de la conductancia máxima, están representados en la Figura 5. En el tratamiento Control, los valores de  $\Psi_{\text{foliar}}$  se mantuvieron en torno a -1,0 y -2,0 MPa, excepto el día 200 que se alcanzó un valor medio de -2,6 MPa, coincidiendo con una subida de la demanda evaporativa ( $E_{\text{To}}= 8\text{mm}$ ) y un registro de la temperatura máxima de 40,8 °C. Los valores de  $\Psi_{\text{foliar}}$  para el tratamiento RDC fueron en todo momento más bajos que los del tratamiento Control durante el período experimental; encontrándose la primera diferencia significativa el día 178, 12 días después del inicio del endurecimiento masivo del hueso.



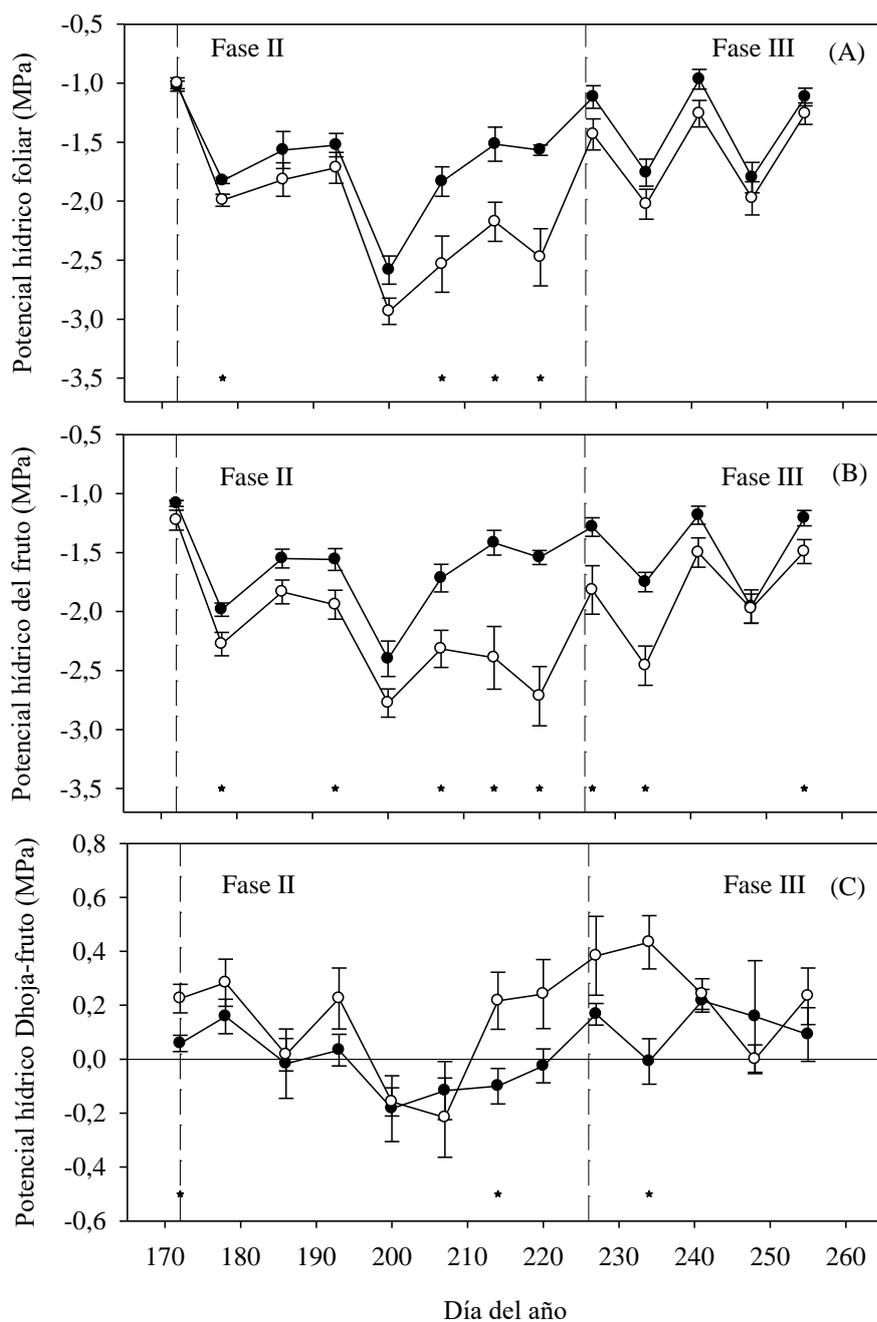
**Figura 4.** Evolución del potencial hídrico del tallo al mediodía (A) y conductancia estomática máxima (B), en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ( $p < 0.05$ , test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 (A) o 12 (B) datos.

También se encontraron diferencias significativas desde el día 207 hasta la rehidratación, momento a partir del cual el potencial hídrico foliar no mostró diferencias significativas entre tratamientos, lo cual indicó la rápida respuesta de este indicador al aporte de agua tras un período de estrés. Durante la recuperación el tratamiento RDC tuvo la misma tendencia que el Control en este parámetro, pero con valores ligeramente más bajos. En cuanto al potencial hídrico del fruto, los valores de  $\Psi_{\text{fruto}}$  en el tratamiento Control estuvieron en torno a los -1,5 MPa, excepto el día 200 que se alcanzó un valor medio de -2,4 MPa debido

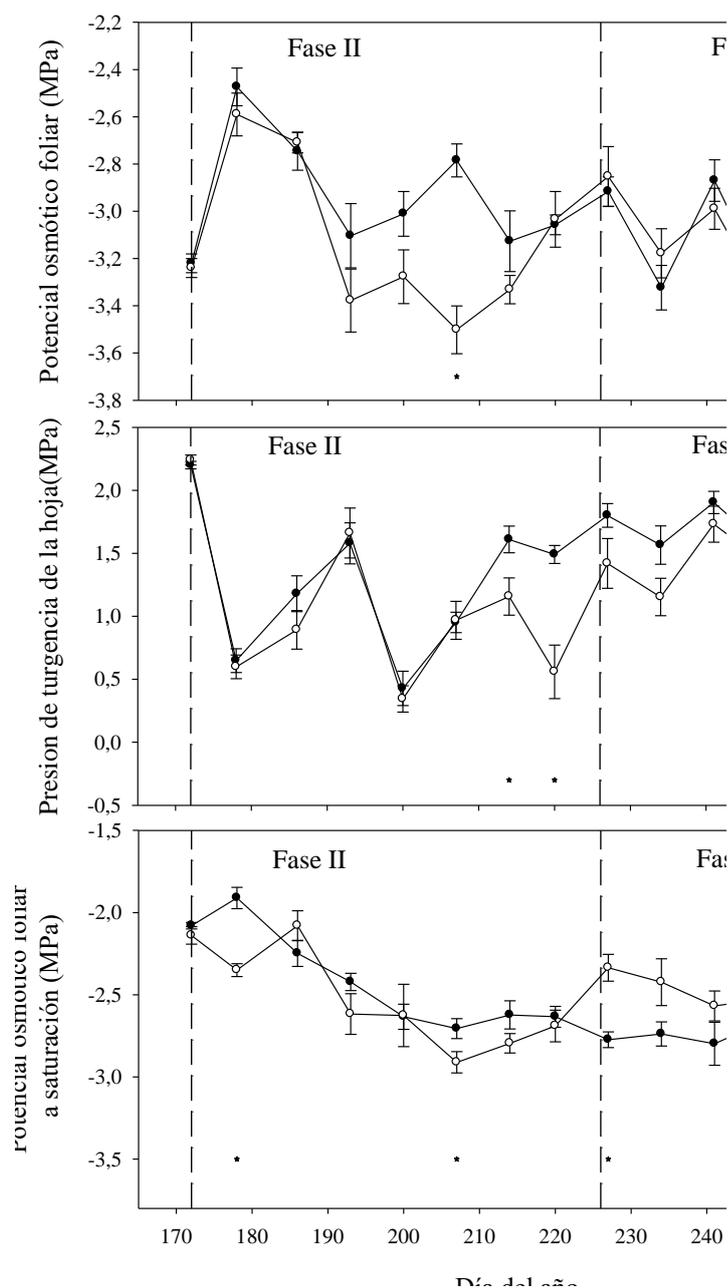
a las condiciones ambientales en ese momento al igual que ocurrió con el potencial hídrico foliar. El tratamiento RDC presentó una clara tendencia descendente, encontrándose la máxima diferencia entre tratamientos el día 220, justo antes de la fase de rehidratación. Las diferencias significativas tuvieron lugar durante toda la fase II y parte del periodo de recuperación (desde el día 193 hasta el 234) salvo el día 200. Hay que señalar que la recuperación hídrica, en los árboles estresados, a nivel de fruto fue más lenta que a nivel de hoja.

La diferencia entre  $\Psi_{\text{foliar}}$  y  $\Psi_{\text{fruto}}$  ( $\Delta\Psi$ ) presentó un patrón semejante entre ambos tratamientos en la primera parte de la fase II, manteniéndose así hasta el día 214 (Figura 5C). A partir de esta fecha hubo un aumento drástico del valor de  $\Delta\Psi$  en el tratamiento RDC, pasando de -0,22 MPa a +0,22 MPa y dando lugar a las primeras diferencias significativas entre tratamientos. A partir de ese día, los valores de  $\Delta\Psi$  en el tratamiento RDC continuaron aumentando paulatinamente hasta el día 234, en el que se alcanzó el valor más alto de  $\Delta\Psi$  (0,43 MPa) frente a los 0,00 MPa encontrados ese mismo día en los árboles Control, y siendo estas diferencias estadísticamente significativas. Los valores de  $\Delta\Psi$  en tratamiento RDC volvieron a descender 15 días después de la rehidratación, igualándose ambos tratamientos.

Los valores del potencial osmótico ( $\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ ), presión de turgencia ( $\Psi_p \text{ foliar}$ ) y el potencial osmótico a saturación ( $^{100}\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ ) de la hoja están representados en la Figura 6 A, B y C, respectivamente. En la primera fase del endurecimiento masivo del hueso, los valores del  $\Psi_{\pi \text{ foliar}}$  fueron muy similares en ambos tratamientos; sin embargo, a partir del día 193, se observó una disminución del potencial osmótico foliar en los árboles RDC encontrándose diferencias significativas con respecto al Control el día 207 (Figura 4A). A partir de este día se observó un aumento de los valores de  $\Psi_{\pi \text{ foliar}}$  en el tratamiento RDC hasta igualarse a los del tratamiento Control. En cuanto a la presión de turgencia de la hoja,  $\Psi_p \text{ foliar}$ , (Figura 6B), los valores oscilaron entre 0,4 y 2,0 MPa durante el período experimental en ambos tratamientos.



**Figura 5.** Evolución del potencial hídrico foliar (A), potencial hídrico del fruto (B) y la diferencia entre el potencial hídrico del fruto y foliar ( $\Delta\Psi$ ) (C) en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). El potencial hídrico foliar y de fruto fue medido a la misma hora que la conductancia estomática máxima. Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ( $p < 0.05$ , test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto representa la media de 6 datos.



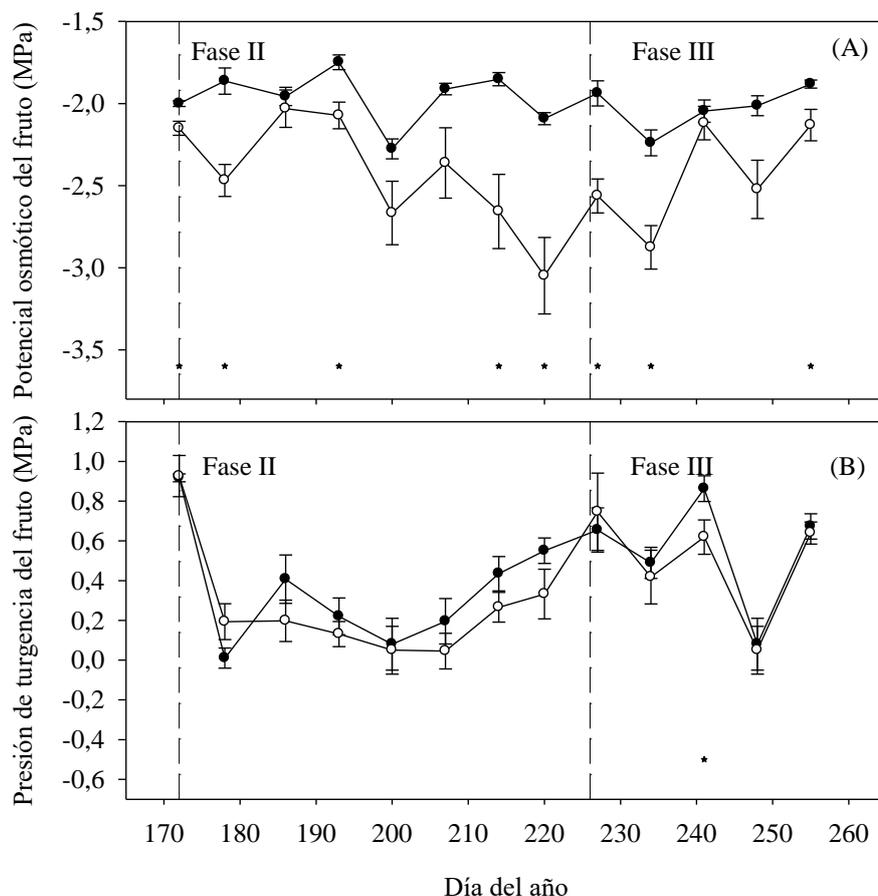
**Figura 6.** Evolución del potencial osmótico foliar (A), presión de turgencia de la hoja (B) y potencial osmótico foliar a saturación (C) en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). Las medidas se realizaron a la hora de medida de la conductancia foliar máxima. Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ( $p < 0.05$ , test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 valores.

El valor más bajo de este parámetro se registró el día 200, coincidiendo con los valores de mayor demanda evaporativa como ya se indicó anteriormente. El valor máximo de  $\Psi_p$  foliar, se alcanzó al final de la fase de rehidratación, día 255, cuando las condiciones hídricas fueron más favorables. Los dos tratamientos presentaron el mismo patrón de comportamiento hasta el final de la fase II, días 214 y 220, en los que se produjo un descenso estadísticamente

significativo del  $\Psi_p$  foliar en los árboles del tratamiento RDC con valores de 0,46 y 0,93 MPa, respectivamente. Con el comienzo de la rehidratación el  $\Psi_\pi$  foliar de RDC siguió la misma tendencia ascendente que los árboles Control, aunque con valores ligeramente más bajos, no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos. El potencial osmótico a saturación,  $^{100}\Psi_\pi$  foliar, del tratamiento Control tendió a decrecer a lo largo de todo el período experimental (Figura 4C). Desde el inicio hasta la primera mitad de la fase II, la caída del  $^{100}\Psi_\pi$  foliar para el tratamiento Control fue de unos 0.8 MPa, estabilizándose posteriormente con una ligera tendencia descendente hasta el final de la experiencia. El potencial osmótico a saturación,  $^{100}\Psi_\pi$  foliar del tratamiento RDC siguió un comportamiento similar al del tratamiento Control hasta la primera mitad de la fase II. El día 207,  $^{100}\Psi_\pi$  foliar en el tratamiento RDC fue significativamente más bajos que en el tratamiento Control, produciéndose, a partir de ese día, una tendencia a incrementarse progresivamente. Este incremento finalizó al comienzo del periodo de rehidratación teniendo los árboles RDC valores significativamente superiores a los del tratamiento Control aproximadamente en 0,44 MPa. Durante la fase de rehidratación los valores del  $^{100}\Psi_\pi$  foliar del tratamiento RDC tendieron a descender progresivamente hasta llegar a valores similares al Control en torno a -2,65 MPa (Figura 6C).

La evolución del potencial osmótico del fruto ( $\Psi_\pi$  fruto), se muestra en la Figura 7(A). El tratamiento Control presentó valores estables alrededor de -2MPa a lo largo de todo el período experimental, mientras que los valores del tratamiento RDC tendieron a descender; especialmente en la fase de endurecimiento masivo del hueso, fase II, desde valores próximos a -2 MPa medidos los días 172, 178 y 193 hasta llegar a -3 MPa el día 220, justo antes de la fase de rehidratación. Las diferencias entre ambos tratamientos fueron más marcadas a medida que se fue agotando la reserva hídrica del suelo, final de la fase II, siendo significativas desde el comienzo del periodo. Durante la fase de rehidratación, fase III, los valores del  $\Psi_\pi$  fruto en el tratamiento RDC tendieron a aumentar rápidamente, aunque los valores continuaron significativamente por debajo del Control, los días 227, 234 y 255. A pesar de todo, el tratamiento RDC alcanzó los mismos  $\Psi_\pi$  fruto que al inicio del período de estrés. Los valores de presión de turgencia del fruto fueron muy similares entre tratamientos solo con una diferencia significativa en el periodo de rehidratación, fase III (Figura 7 B). Durante la fase II, los valores en ambos tratamientos oscilaron entre cercanos a 0 hasta 0.6 MPa. Los valores cercanos a 0 pudieron estar relacionados con días de temperaturas muy elevadas día 186 (36.75 °C), día 200 (40.83 °C) pero no el día 207 (31.92 °C) para el

tratamiento RDC. Aunque no hubo diferencias significativas en la fase II, los valores RDC tendieron a ser menores que los del Control desde el día 186.

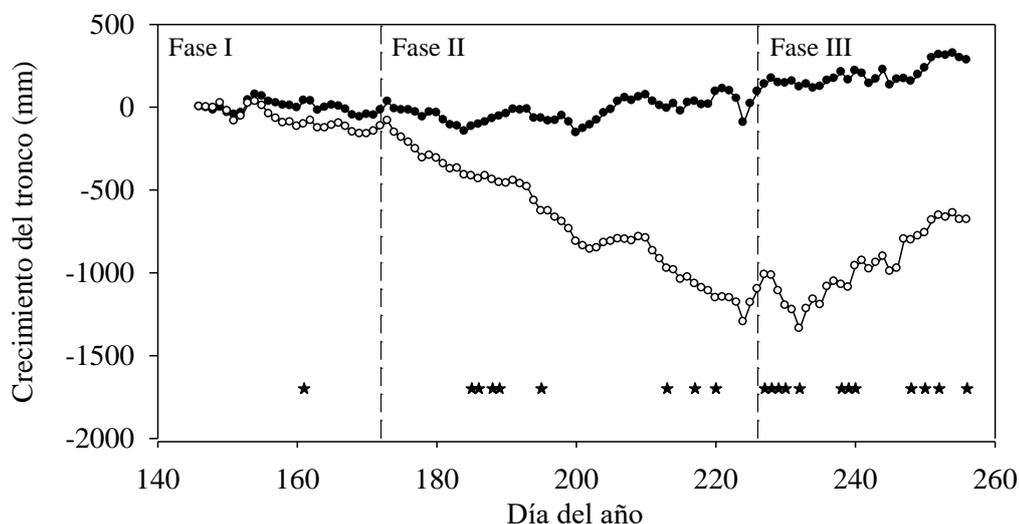


**Figura 7.** Evolución del potencial osmótico del fruto (A) y presión de turgencia del fruto (B) medidos a la hora de la conductancia estomática máxima, en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ( $p < 0.05$ , test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 datos.

Al comienzo de la fase III hay un claro cambio de tendencia con valores de presión de turgencia similares o incluso mayores en el tratamiento RDC que en el Control. Solamente el día 241 el tratamiento RDC presentó valores significativamente menores.

Los sensores de variación del diámetro del tronco dan varios parámetros que permiten establecer el estado hídrico de la planta (Goldhamer et al., 1999). En olivo el más útil es la tasa de crecimiento del tronco (TCT, Moriana y Fereres, 2002). Sin embargo, la TCT es muy variable diariamente por lo que para una mayor claridad en los datos se presenta el crecimiento del tronco (Figura 8). El parámetro a considerar (la TCT) es la pendiente de esta figura y las estrellas indican las fechas en las que hubo diferencia significativas en este

parámetro. En la Tabla 4 se presentan las medias de la TCT por estados fenológicos. El crecimiento del tronco durante la fase I fue nulo, siendo la media del periodo en los dos tratamientos ligeramente negativa. Estos valores pudieron estar relacionados con unos niveles de nitrógeno en hoja ligeramente inferiores a los adecuados. Durante la fase II el tratamiento RDC tuvo unas TCT claramente negativas e inferiores a las obtenidas en el Control (Figura 8 y Tabla 4). Esto supuso una contracción neta del tronco hasta el final de la fase II. La TCT en el tratamiento RDC fue muy similar en todo el periodo (Tabla 4), sólo hubo una breve recuperación a partir del día 200 (Figura 8) y que pudo estar relacionada con una disminución brusca de la temperatura (Figura 4). A partir de la fase de rehidratación, la TCT del tratamiento RDC fue positiva y la media del periodo mayor que la obtenida en los árboles Control (Figura 8 y Tabla 4).



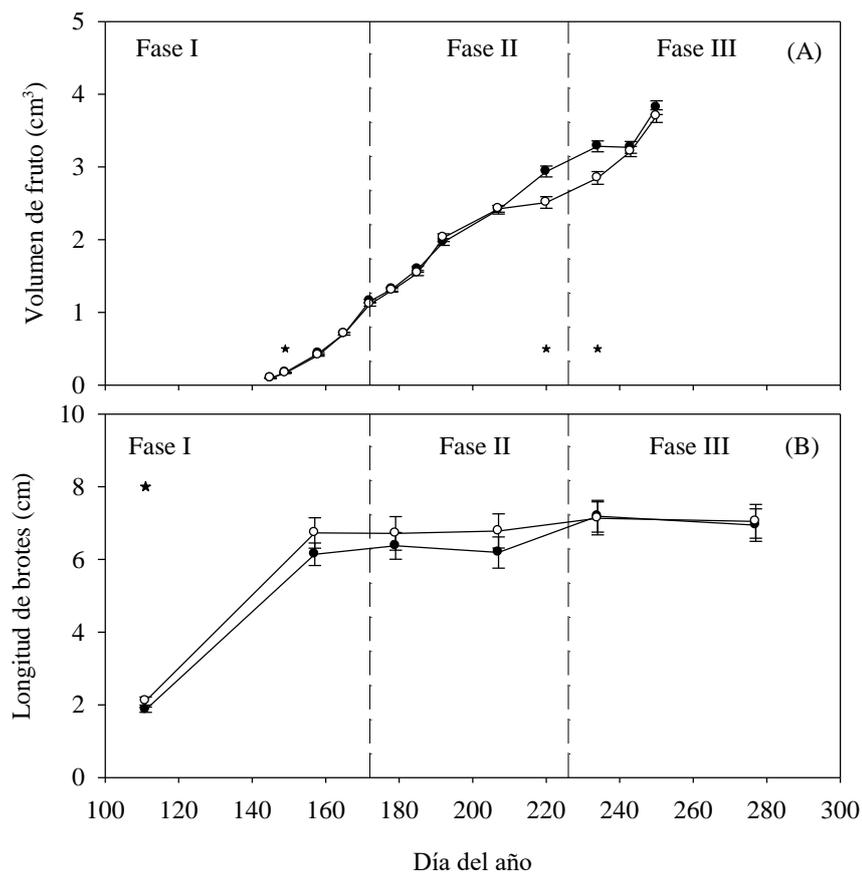
**Figura 8.** Evolución del crecimiento del tronco en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos) durante todas las fases del cultivo. Las estrellas indican el momento en el que la tasa de crecimiento del tronco fue significativamente diferente ( $p < 0.05$ , test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 datos.

**Tabla 4.** Promedio de la tasa de crecimiento del diámetro del tronco (TCT) en los tres periodos fenológicos diferenciados durante el cultivo. El estado fenológico de endurecimiento de hueso se ha subdividido en dos fases por los cambios detectados en las relaciones hídricas entorno al día 214.

	Control ( $\mu\text{m día}^{-1}$ )	RDC ( $\mu\text{m día}^{-1}$ )
<b>Fase I (DDA 155-172).</b>	$-5,4 \pm 3,7$	$-7,8 \pm 3,7$
<b>Fase II (DDA 173-231).</b>	$3,2 \pm 2,6$	$-20,8 \pm 3,1$
<b>Fase III (DDA 232-256).</b>	$4,5 \pm 3,8$	$22,2 \pm 7,4$
<b>Fase IIa (DDA 173-214)</b>	$1,4 \pm 2,5$	$-20,1 \pm 2,7$
<b>Fase IIb (DDA 214-231)</b>	$5,6 \pm 2,3$	$-22,9 \pm 8,7$

El volumen de fruto presentó un crecimiento continuo a lo largo de todo el experimento para ambos tratamientos, Figura 9 (A). Al final de la fase de endurecimiento masivo del hueso, el volumen de fruto en el tratamiento Control fue significativamente mayor que el encontrado en el tratamiento deficitario; sin embargo, estas diferencias desaparecieron a lo largo de la fase de rehidratación. En ningún tratamiento, ni siquiera en el deficitario, hubo una parada en el crecimiento del fruto, solamente una ralentización en la velocidad de crecimiento, concretamente a partir del día 200. El periodo de rehidratación aunque fue breve, en torno a 2 semanas, fue suficiente para recuperar un tamaño de fruto similar al del Control.

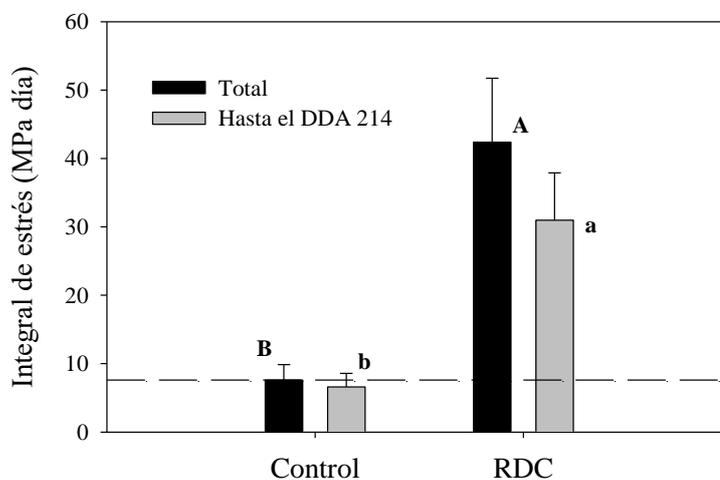
La longitud de brotes se presenta en la Figura 9 B. No hubo diferencias significativas entre tratamientos en ninguna de las fases estudiadas. En ambos tratamientos el crecimiento ocurrió especialmente durante la fase I de cultivo, en el resto la longitud obtenida fue prácticamente constante. Este tipo de evolución es el característico de olivar en años con una cantidad significativa de fruto. A partir de la fase de endurecimiento el fruto se convierte en un sumidero muy importante de nutrientes lo que produce la parada del crecimiento vegetativo (Rallo y Suárez, 1989) independientemente de su estado hídrico.



**Figura 9.** Evolución del volumen de fruto (A) y longitud brotes (B) en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos) durante todas las fases del cultivo. Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas indican el momento en el que la tasa de crecimiento del tronco fue significativamente diferentes ( $p < 0.05$ , test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental.

La disminución de la velocidad de crecimiento del fruto, como otros parámetros de relaciones hídricas, tuvo lugar al final de la fase II. Sin embargo, el estado hídrico de los árboles RDC llegó a su valor mínimo de potencial, alrededor de 2 semanas antes de que se afectase el fruto. Esto sugiere un efecto acumulativo del déficit hídrico que no ha sido evaluado con ninguno de los parámetros anteriores. La Figura 10 presenta los datos de integral de estrés durante toda la fase II y hasta la fecha del último dato de crecimiento del fruto en el que no hubo diferencias significativas (DDA 214, Figura 9). La integral de estrés hídrico antes del día 214 fue significativamente diferente entre los tratamientos Control y RDC. Los valores obtenidos en este periodo de tiempo tuvieron como máximo valores alrededor de 31MPa·día para el tratamiento RDC y en torno a 6,6 MPa·día para el control. Cuando se considera el total del período experimental, las diferencias siguieron siendo significativas entre tratamientos. Los valores totales del Control estuvieron en torno a 7,6

MPa·día mientras que los de los árboles RDC, continuaron aumentando hasta valores superiores a 42 MPa · día.



**Figura 10.** Integral de estrés hídrico durante todo el periodo de endurecimiento masivo del hueso (negro) o hasta el día del año 214 (gris) tomando como referencia el valor -1.4 MPa. Cada columna es la media de 6 datos. Las líneas verticales indican el error estándar. La línea horizontal indica el valor de la integral de estrés en el mismo periodo de tiempo del trabajo de Dell'Amico et al. (2012)(75 MPa·día). Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ , Test de Duncan).

La Tabla 5, resume el efecto del manejo del riego en los diferentes factores de la producción de aceituna de mesa. La cantidad de agua aplicada fue muy diferente entre los dos tratamientos: el agua en el tratamiento deficitario fue aproximadamente un 30% de la aplicada en el tratamiento Control. No hubo diferencias significativas entre ninguno de los parámetros productivos. El nivel productivo obtenido se puede considerar como de media cosecha y aunque el Control tendió a valores algo superiores de cosecha, las diferencias fueron sólo de alrededor de un 10%. No obstante cualquier conclusión a cerca de la cosecha requiere al menos de 3 años de datos. Los datos de calidad indicaron aceitunas de tamaño similar, ligeramente mayores en el Control con un color adecuado en cosecha y una relación pulpa hueso buena.

**Tabla 5.** Resultados de producción. Cada cifra va acompañada de su error estándar

Cosecha(Tm /ha)	Escandallo(f rutos/kg)	Pulpa/hueso Fresco	Pulpa/hueso Seco	Índice Madurez	Agua Aplic.(mm)

**CAPITULO 1. Cambios en la respuesta fisiológica entre hojas y frutos durante un estrés hídrico moderado.**

Control	6,6 ± 0,7	233 ± 13	4,1 ± 0,1	1,9 ± 0,1	0,8 ± 0,2	412
RDC	5,9 ± 0,7	240 ± 10	4,4 ± 0,2	2,3 ± 0,1	0,9 ± 0,1	111

#### 4.1.2 DISCUSIÓN

El inicio del período de estrés estuvo marcado por un descenso constante de las reservas hídricas del suelo para el tratamiento RDC, provocado tanto por la alta demanda evapotranspirativa como por la falta de agua en el suelo, haciendo que este período estuviese dominado por las diferencias en el potencial hídrico del tronco ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ) que abarcaron casi todo el periodo de endurecimiento del hueso (Figuras 3 C y 4 A). Sin embargo, este estrés estuvo diferenciado según la evolución del crecimiento del fruto, en dos partes: una moderada, en la que no hubo diferencias significativas entre tratamientos en relación al crecimiento del fruto, aproximadamente hasta el día del año 214, y otra más severa en la que sí se vio afectado (Figura 9 A).

La primera parte del periodo de déficit hídrico, antes del día 214, afectó de forma significativa a la conductancia estomática foliar, al potencial de tallo medido al mediodía y a la tasa de crecimiento del tronco (TCT) prácticamente en la misma fecha aunque sensiblemente antes en el caso de la conductancia estomática y la TCT (Figuras 4 y 8). Esta mayor precocidad del intercambio gaseoso por efecto del estrés no es la respuesta habitual. Hsiao (1990) indica que el crecimiento es el proceso más sensible en condiciones de sequía. Pérez-López et al., (2007) en olivares jóvenes encontraron diferencias en crecimiento en ausencia de diferencias de potencial hídrico y conductancia estomática. No obstante, en olivares adultos durante el endurecimiento del hueso el crecimiento vegetativo es prácticamente nulo (Figura 9 B) por lo que es muy difícil identificar una afección de este proceso. Tampoco todos los trabajos están de acuerdo en una afección más precoz del intercambio gaseoso que el potencial de tallo (Moriana y Fereres, 2002) aunque sí se ha descrito en otros (Fernández et al., 1997; Díaz-Espejo et al., 2007). Los árboles RDC del presente trabajo llevan en condiciones de riego deficitario controlado varios años lo que podría repercutir en una respuesta más rápida de lo habitual del intercambio gaseoso al estrés hídrico. Fereres y Goldhamer (1990) sugieren que el riego deficitario afecta al largo plazo a los valores de conductancia estomática en frutales, incluso cuando se vuelven a regar de forma no limitante. También puede estar relacionada con un incremento del volumen de raíces en zonas secas lo que daría lugar al efecto de la señal de raíz ya descrita en olivo (Wahbi et al., 2005; Fernández et al., 2006).

Esta respuesta inicial probablemente dio lugar a una reducción en la transpiración, producida por el significativo cierre estomático (Fernández et al., 1997; Tognetti et al., 2009; Boughalleb y Hajlaoui, 2011), pero dicho cierre estomático no llega a afectar al potencial

hídrico de la hoja medido a la misma hora ( $\Psi_{\text{foliar}}$ ), ya que no muestran diferencias durante esos días (Figura 5 A). La ausencia de afección en el  $\Psi_{\text{foliar}}$  podría estar relacionada, además de con el control estomático, con el proceso de rápida deshidratación del tronco que podría compensar la deshidratación del árbol (Figura 8) y un cierto nivel de ajuste osmótico (Figura 6 C). Cermak et al. (2007) trabajando en *Pseudotsugamenziesii* (Mird.) Franco sugiere que el agua almacenada en el tronco puede jugar un papel de gran importancia durante la primera semana del periodo de estrés hídrico. El ajuste osmótico ha sido descrito como una respuesta típica en olivar en diferentes niveles de déficit hídrico (Dichio et al., 1997; 2003) aunque una imposición rápida del estrés podría evitar su identificación (Turner y Jones, 1980). Posiblemente esta es la razón por la que solamente un dato de potencial osmótico a saturación (que nos indicaría el ajuste osmótico) fue significativamente menor al inicio del estrés (Figura 6 C). Dell'Amico et al. (2012), en una parcela de olivar vecina a la del presente trabajo, observó ajuste osmótico foliar al final de un periodo de estrés hídrico mucho menos severo que el presentado en la Figura 4.

El potencial hídrico del fruto, en cambio, sí tiene una caída significativa en este periodo (Figura 4 B) que sin embargo no afecta al potencial de turgencia (Figura 7C) ni al crecimiento del fruto (Figura 9) del tratamiento RDC. En este caso, el descenso del potencial hídrico del fruto ( $\Psi_{\text{fruto}}$ ) probablemente se compensó por el ajuste osmótico derivado de la acumulación de solutos en sus células o con otro mecanismo de adaptación. Las diferencias en potencial osmótico en el fruto entre tratamientos sugieren que el proceso de ajuste osmótico pudo ser importante pero al no tener datos de potencial osmótico a saturación en fruto no podemos tener certeza. En brote se han descrito también variaciones en módulo de elasticidad o el contenido de agua del simplasto como mecanismos para atenuar el efecto del estrés (Dichio et al., 1997). Dell'Amico et al. (2012) en condiciones de estrés hídrico mucho menores en la misma parcela también sugieren procesos de ajuste osmótico en el fruto que evita la disminución del potencial de turgencia del fruto.

En la siguiente fase del periodo de estrés hídrico durante el endurecimiento del hueso, la respuesta fisiológica de la planta comenzó a cambiar. La manifestación más evidente fue la ralentización en la velocidad de crecimiento del fruto, llegándose a producir diferencias a partir del día 220 (Figura 9). Esta disminución coincide con una caída significativa de la presión de turgencia en hoja (Figura 6 B) y una tendencia a valores menores en la presión de turgencia del fruto, aunque sin diferencias significativas (Figura 7 B). Además en este periodo los brotes RDC presentaron una mayor diferencia entre el potencial hídrico foliar y el de fruto que los árboles Control (Figura 5 C). La pérdida de turgencia en hoja podría suponer el

comienzo de una disminución de la asimilación. Mientras que esa tendencia a una disminución de la turgencia en fruto es la que podría estar relacionada con la disminución en la velocidad de crecimiento del fruto. Los cambios en el diferencial de potencial hídrico foliar y de fruto ( $\Delta\Psi$ ) indican cambios en el flujo de agua hacia el fruto. El incremento del valor de  $\Delta\Psi$  sugieren un mayor aporte de agua al fruto vía xilema que vía floema. Los trabajos en otras especies indican que este diferencial suele disminuir por efecto del estrés hídrico (vid, Greenspan et al., 1996; fresón, Pomper y Breen, 1997). Dell'Amico et al. (2012) en olivar describen al comienzo de un estrés hídrico muy poco severo una disminución de  $\Delta\Psi$ . Estas desavenencias con los resultados del presente trabajo podrían estar relacionados con un nivel de deshidratación mayor en este (Figura 4 A) que en otros experimentos.

Estos cambios fisiológicos detectados a partir del día 214 no están claramente relacionados con un incremento en el nivel de estrés hídrico del árbol. Los valores de  $\Psi_{\text{tallo}}$  y  $g_{\text{max}}$  permanecieron prácticamente constantes respecto al periodo anterior (Figura4) aunque se mantuvo la caída del diámetro del tronco (Figura 8). Algo parecido es lo que ocurre en el perfil hídrico del suelo que se encuentra con valores que tienden a ser muy similares, al ir aproximándose al punto de marchitez permanente (Figura 3 C). El nivel de estrés hídrico obtenido en el presente trabajo se puede considerar de moderado. Moriana et al. (2012) ha sugerido en olivar en esta fase de cultivo que un nivel adecuado de potencial hídrico para un riego cercano al óptimo sería de -1.4 MPa. Los trabajos de la bibliografía en riego en olivar obtienen valores muy por debajo de los aquí presentados (p ej., -6 MPa, Moriana et al. (2003); -3 MPa, Whabi et al. (2005); -3.9 MPa, Iniesta et al. (2009)). Hsiao (1990) indica que el efecto del estrés hídrico en un mismo estado fenológico es la suma del nivel y de la duración de éste, lo que podría dificultar el uso de estos indicadores en la programación del riego. Dell'Amico et al. (2012) sugieren el umbral de -1.8 MPa como indicador de manejo para la no afección del tamaño del fruto. Sin embargo, a tenor de los resultados obtenidos, sería preciso, además, el uso de una medida como la integral de estrés que permite considerar los efectos de duración y nivel. En este aspecto, un valor de 31 MPa·día podría ser el umbral a partir del cual el tamaño de fruto se ve afectado. No obstante sería preciso estudios posteriores que pudiesen verificar este valor. Los valores de la integral de estrés se han relacionado con las características organolépticas (Moriana et al. 2007) y el contenido de aceite (Moriana et al., 2012). Incluso este último trabajo incluyendo datos de localidades y variedades diferentes (Moriana et al., 2012).

El periodo de rehidratación permitió una recuperación progresiva de la fisiología del árbol de forma que el volumen de fruto y el tamaño medido en cosecha no fue significativamente diferente entre los tratamientos. Los parámetros estudiados indican que hubo una jerarquización en la recuperación de los árboles. Los valores de potencial de tallo y conductancia estomática no se recuperaron completamente hasta el final del experimento, mientras que otros parámetros como el volumen de fruto, potencial hídrico foliar y de fruto y su diferencial y el potencial de turgencia lo hicieron unas dos semanas antes. Esto supone que aparentemente el árbol recuperó preferentemente antes el crecimiento del fruto que el estado hídrico del brote. La capacidad de rehidratación es una cuestión clave para la aplicación de riego deficitario (Behboudian y Mills, 1997). El intercambio gaseoso en olivo se ha descrito como el parámetro más tardío en la recuperación de los árboles (Larcher et al., 1981), aunque no todos los trabajos coinciden con esta conclusión (Fernández et al., 1997; Giorio et al., 1999). Estas discrepancias se han sugerido que pueden estar asociadas con el nivel de estrés hídrico y el volumen de suelo humedecido durante el periodo de rehidratación (Pérez-López et al., 2008). Los resultados del presente trabajo podrían sugerir que el nivel de carga en los árboles también podría ser un factor a considerar.

## **4.2 CONCLUSIONES**

La respuesta del árbol durante la fase de endurecimiento del hueso a un periodo de déficit hídrico estuvo relacionada con el nivel y la duración del estrés impuesto. La cuantificación mediante la integral de estrés permite diferenciar dos fases con un valor umbral de 31 MPa·día que indicarían el comienzo de un periodo más severo. Al inicio del periodo de estrés, con valores inferiores a 31 MPa·día, la deshidratación de la hoja y el cierre estomático provocados por la disminución de agua del suelo fueron atenuados en la hoja por ajuste osmótico y, posiblemente, por la deshidratación parcial del tronco. La disminución del potencial hídrico del fruto no repercutió en su potencial de turgencia ni en el crecimiento lo que podría estar relacionado con diferentes adaptaciones que no pudieron ser evaluadas. Cuando el estrés hídrico fue superior a los 31 MPa·día hubo un cambio significativo en la fisiología de los árboles. El incremento del diferencial entre potenciales de hoja y fruto sugiere una mayor entrada de agua al fruto vía xilema lo que podría estar asociado a una pérdida de turgencia de la hoja. Estos cambios no evitaron una desaceleración del crecimiento del fruto posiblemente ligada a una bajada en el potencial de turgencia, aunque las diferencias no fueron significativas. La rehidratación de los árboles fue completa al final del experimento. Sin embargo, la mayor velocidad en la recuperación del volumen de fruto, potencial hídrico de fruto y hoja y el diferencial entre ambos respecto a la conductancia estomática y el potencial de tallo sugieren que el fruto actuó como sumidero preferente respecto al resto del árbol.



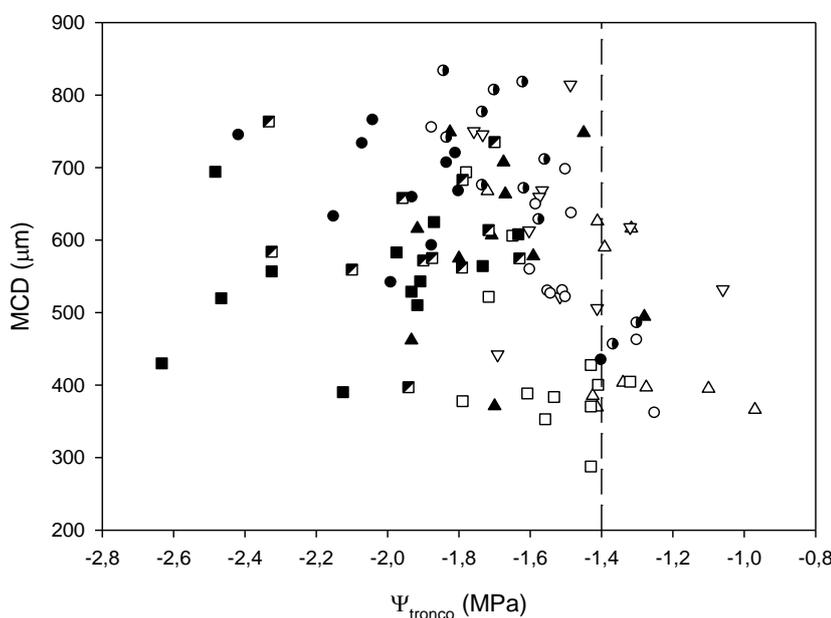
## 5 CAPITULO 2. MANEJO DE LA INFLUENCIA AMBIENTAL EN LOS INDICADORES DE LA VARIACIÓN DIARIA DEL DIÁMETRO DEL TRONCO.

### 5.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1.1 RESULTADOS

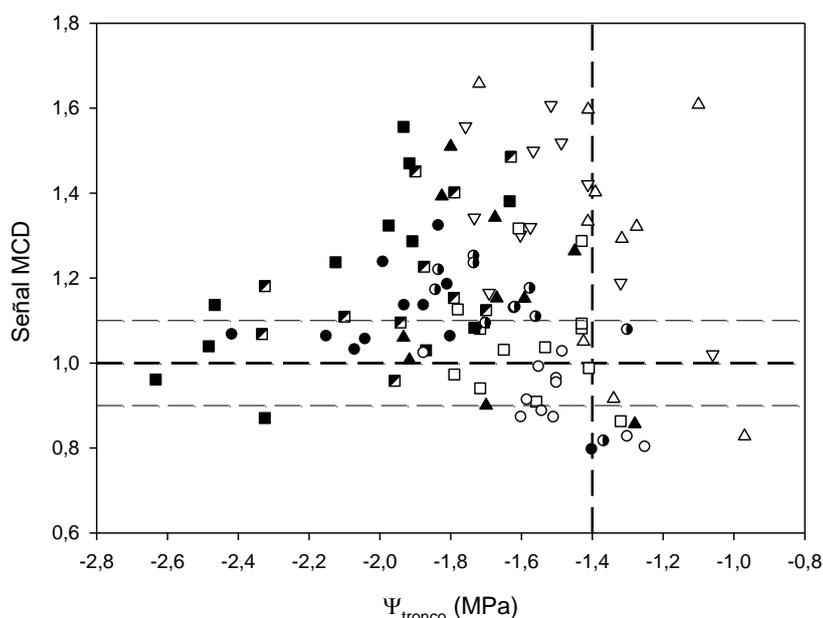
##### *Líneas Base de la MCD*

La Figura 11 muestra la relación entre  $\Psi_{\text{tronco}}$  (potencial hídrico de tronco) y la Máxima Contracción Diaria (MCD) en los tres años de estudio. Los valores de  $\Psi_{\text{tronco}}$  variaron de -1.0 MPa a -2.6 MPa, mientras que los de MCD lo hicieron entre 300 y 800  $\mu\text{m}$ . No hubo ninguna relación clara entre ambos indicadores, aunque hubo una tendencia a un gran incremento de MCD desde los valores más bajos de  $\Psi_{\text{tronco}}$  hasta valores alrededor de -1.6 MPa.



**Figura 11.** Relación entre el potencial hídrico de tronco ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) medido al mediodía frente a la máxima contracción diaria (MCD) durante los 3 años de estudio. Cada símbolo es la media de 6 medidas. El periodo de medida fue desde el comienzo del endurecimiento del hueso hasta cosecha. Símbolos: Año 2011, triángulos; Hacia arriba y vacíos Control, hacia abajo y vacíos RDC 2, hacia arriba y llenos RDC 12. Año 2012, cuadrados; vacíos Control, medio llenos RDC 2, llenos RDC 12. Año 2013, círculos; vacíos Control, medio llenos, RDC 2, llenos RDC 12. La línea vertical representa el valor de potencial hídrico de referencia en ausencia de estrés hídrico (-1.4 MPa).

Los mismos valores se presentan en la Figura 12, pero comparando los valores de potencial hídrico con los de la *señal* MCD. La dispersión es también elevada y no hubo una relación significativa entre ambos indicadores. Sin embargo, en la Figura 12, podría asumirse un valor de referencia teórico de 1 de la *señal* MCD en los árboles en condiciones no limitantes de agua.

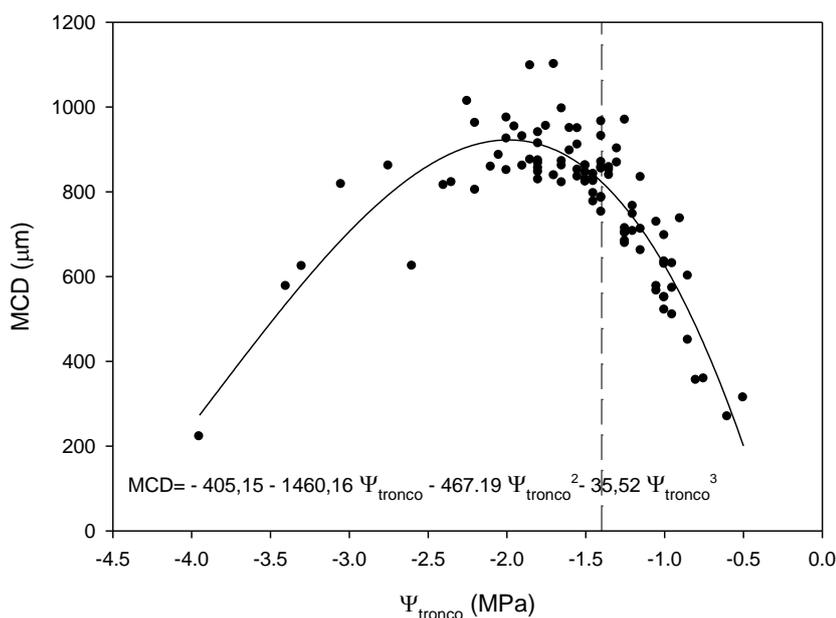


**Figura 12.** Relación entre el potencial hídrico de tronco ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) medido al mediodía frente a la *señal* de la máxima contracción diaria (MCD) durante los 3 años experimentales. Cada punto es la media de 6 medidas. El periodo de medida fue desde el comienzo del endurecimiento del hueso hasta cosecha. Símbolos: Año 2011, triángulos; Hacia arriba y vacíos Control, hacia abajo y vacíos RDC 2, hacia arriba y llenos RDC 12. Año 2012, cuadrados; vacíos Control, medio llenos RDC 2, llenos RDC 12. Año 2013, círculos; vacíos Control, medio llenos, RDC 2, llenos RDC 12. La línea vertical representa el valor de potencial hídrico de referencia en ausencia de estrés hídrico (-1.4 MPa). La línea horizontal discontinua indica el valor de referencia para condiciones en ausencia de déficit hídrico de la *señal* MCD ( $1 \pm 0.1$ ).

En la Figura 12, la mayoría de los valores de los árboles Control en 2012, 9 de 12 y la totalidad de ellos en 2013, la *señal* MCD fue inferior a 1.1, pero sólo en 3 de 11 casos en 2011. En los tratamientos riego deficitario controlado (RDC), la mayor parte de los valores de  $\Psi_{\text{tronco}}$  que estuvieron por encima del valor referencia de potencial hídrico en ausencia de estrés, -1.4 MPa, presentaron una *señal* MCD menor que 1.1 (5 de 6 valores considerando todos los años). Por debajo de este valor de  $\Psi_{\text{tronco}}$  hay tendencias claras de un incremento de la *señal* MCD hasta aproximadamente valores de -2 MPa. La mayor parte de los datos con  $\Psi_{\text{tronco}}$  inferiores a -1.4 y superiores a -2 MPa en los tratamientos RDC tuvieron valores

superiores a 1.1 de *señal* MDC. En el año 2011 se registraron en 15 de 16 valores, en el año 2012 esto ocurrió en 10 de 16 y en 13 de 16 en el año 2013.

La falta de un patrón claro de la MCD frente al  $\Psi_{\text{tronco}}$ , podría estar relacionada con cambios de intensidad en los distintos componentes que afectan a las fluctuaciones del diámetro del tronco (Daudet et al., 2005). Para evitar estos posibles efectos limitantes y obtener la máxima respuesta de la MCD frente al  $\Psi_{\text{tronco}}$ , se establecieron 13 intervalos de  $\Psi_{\text{tronco}}$ , y se determinaron en cada uno de ellos el percentil 90 de MCD (Figura 13).

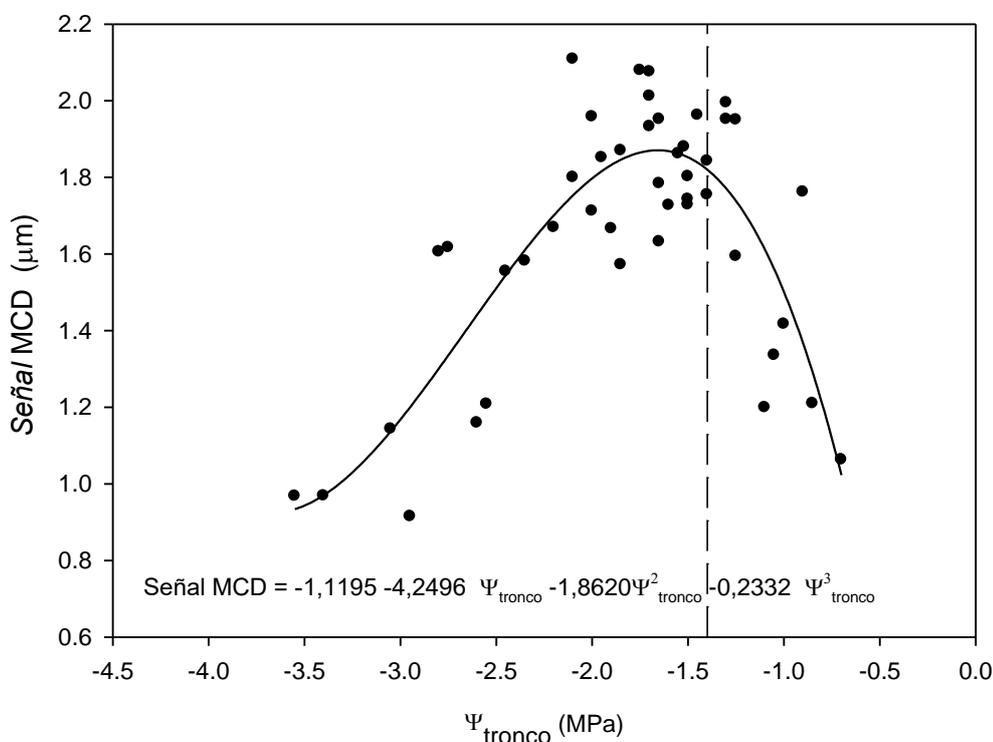


**Figura 13.** Relación entre potencial hídrico de tronco medido al mediodía ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) y máxima contracción diaria (MCD). Cada punto corresponde a un árbol con un valor P90 de MCD agrupados según 13 intervalos de -0.3 MPa de potencial hídrico. ( $\text{MCD} = -405,15 - 1460,16 \Psi_{\text{tronco}} - 467,19 \Psi_{\text{tronco}}^2 - 35,52 \Psi_{\text{tronco}}^3$ ;  $n=93$ ,  $R^2= 0,82$ , Error estándar  $75,00\mu\text{m}$ ). La línea vertical discontinua muestra la referencia de potencial hídrico en condiciones de ausencia de estrés (-1.4 MPa).

Estos cambios redujeron la dispersión y se puede observar una relación curvilínea clara que responde a una ecuación polinómica de tercer grado, con un incremento progresivo de los valores de MCD con la disminución de  $\Psi_{\text{tronco}}$ , desde -0.5 MPa, hasta alrededor de -2 MPa, donde se alcanzan los valores máximos de MCD, en torno a las 1000  $\mu\text{m}$ . A partir de este valor, hubo una clara tendencia a disminuir MCD.

De manera análoga se procesaron todos los datos de la *señal* MCD, correspondientes al percentil 90 (Figura 14), agrupados según los mismos intervalos de  $\Psi_{\text{tronco}}$  utilizados en la

Figura 13 para la MCD. Una *señal* MCD igual a 1 representa, también en esta figura, teóricamente condiciones de ausencia de estrés hídrico. A pesar de la variabilidad de los datos también se puede observar una relación curvilínea clara que responde a una ecuación polinómica de tercer grado (Figura 14).



**Figura 14.** Relación entre potencial hídrico de tronco medido al mediodía ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) y máxima contracción diaria (MCD). Cada punto corresponde a un árbol con un valor P90 de MDS agrupados según 13 intervalos de -0.3 MPa de potencial hídrico. ( $\text{Señal MCD} = -1,1195\Psi_{\text{tronco}} - 4,2496 \Psi_{\text{tronco}}^2 - 0,2332 \Psi_{\text{tronco}}^3$ ;  $n=45$ ,  $R^2= 0,6932$ , Error estándar 0,1893). La línea vertical discontinua muestra la referencia de potencial hídrico en condiciones de ausencia de estrés (-1.4 MPa).

Los datos de la máxima respuesta de la *señal* MCD desde potenciales comprendidos entre -0.5 y -1.6 MPa presentaron un claro aumento de la *señal* MCD alcanzando valores máximos alrededor de 1.8 (Figura 14). También existe una caída progresiva de la *señal* MCD alcanzado cierto nivel de  $\Psi_{\text{tronco}}$  (<-1.6 MPa), hasta llegar a valores por debajo de 1 (Figura 14).

#### *Influencia ambiental en la tasa de crecimiento del tronco*

La evolución de la tasa de crecimiento del tronco (TCT) tiene una gran componente estacional debido a la carga de fruta lo que podría enmascarar el efecto ambiental. Los datos

seleccionados corresponden a árboles Control de los años 2008, 2010, 2012, 2013 y 2014 (Tabla 6) y al periodo de endurecimiento masivo del hueso. Durante este estado fenológico si la carga es suficiente los valores de TCT dan lugar a una evolución de los diámetros máximos que es aproximadamente constante ya que no hay crecimiento vegetativo.

**Tabla 6. Características de los periodos considerados en la evaluación del efecto del ambiente en la tasa de crecimiento (TCT).**

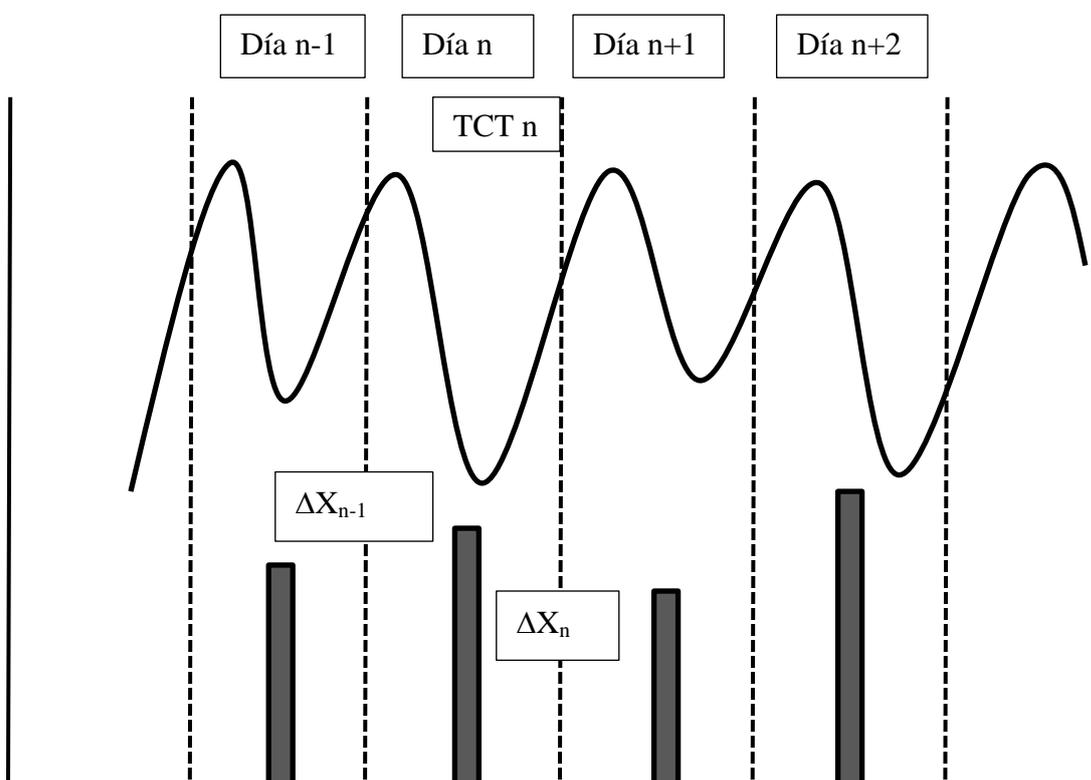
	DDA Fase II	ETo Fase II (mm)	Prec Fase II (mm)	Cosecha (Tm ha <sup>-1</sup> )
2008	172-246	452	11,1	18,3±0,3
2010	166-235	478	15,6	15,0±1,7
2012	173-232	368	0,0	6,6±0,7
2013	176-233	361	0,0	9,0±1,1
2014	168-236	390	6,1	14,7±1,6

La duración de los cinco periodos de endurecimiento masivo del hueso considerados es muy similar, tanto en la fecha de inicio (finales de Junio) como de finalización (final de Agosto) y su duración (entre 57 y 74 días). Tampoco hubo grandes diferencias en la demanda evaporativa ni en la precipitación. En todos los casos fueron periodos secos (la lluvia registrada fue inferior al 10% de la estacional) y de elevada temperatura. Por el contrario, los niveles de cosecha sí fueron muy diferentes. Teniendo en cuenta que la media bienal de cosecha de los árboles control del periodo 2008-2014 está alrededor de 8.0 Tm ha<sup>-1</sup>, en todos los casos podemos considerar que estamos, al menos, en una cosecha media, con tres años en los que las cosechas fueron muy elevadas. A pesar de esta variabilidad en cosecha en los cinco años seleccionados la curva de diámetros máximos en los árboles Control no presentó crecimientos claros, típicos de los años de descarga. Los años de elevadas cosecha, 2008, 2010 y 2014, los árboles Control presentaron una reducción del diámetro del tronco al final de la fase de endurecimiento de -282, -166 y -517  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Mientras que en 2012 y 2013 con niveles más moderados de cosecha dieron lugar a un incremento del diámetro de 88 y 16  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

El resultado de las regresiones lineales entre las variables meteorológicas seleccionadas se presenta en la Tabla 7. Ninguna de las variables empleadas en ninguno de los años tuvo un buen ajuste, en muchos casos ni siquiera fue significativo. El año 2008 fue especialmente pobre en resultados con la mayor parte de las regresiones no significativas. Solamente hay un valor más destacable en el año 2012, el déficit de presión de vapor medio (DPVmed) presentó un ajuste significativo con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.3.

Si se considera el incremento de cada una de estas variables tal y como se calcula la TCT (incremento del día  $n =$  la diferencia entre el valor del día  $n+1$  y el valor  $n$ , Figura 15) los ajustes fueron peores que usando el valor absoluto (Tabla 7). Solamente el incremento de la humedad relativa media (HRmed) durante el año 2013 estuvo entre las cuatro mejores relaciones con la TCT (Tabla 7). Sin embargo, cuando el incremento se relaciona no con el día que se ha calculado sino con el día siguiente mejoran de forma muy clara las relaciones obtenidas (Tabla 7). En la Tabla 7 se presentan las tres mejores regresiones para cada año y, en todos los casos, la regresión con el incremento de DPVmed, excepto para el año 2008 en el que no fueron significativas.

Los incrementos del día anterior ( $\Delta X_{n-1}$ ) en humedad relativa (HR), la temperatura (T) y el déficit de presión de vapor (DPV) fueron las mejores variables en su relación con la TCT (Tabla 7). En todos los años de estudio el  $\Delta DPV_{n-1}$  med (incremento del día anterior en DPV medio) fue la mejor variable a excepción del año 2010 cuando fue la segunda. Los coeficientes de determinación obtenidos con esta variable estuvieron entre 0,34 del año 2010 hasta 0,61 del año 2012 y 2013 (Tabla 7). La siguiente variable en importancia fue el  $\Delta HR_{n-1}$  med (incremento del día anterior de la humedad relativa media) aunque los coeficientes de determinación calculados fueron sensiblemente inferiores a los de  $\Delta DPV_{n-1}$  med estando entre 0,20 del año 2010 y 0.52 del año 2012. El resto de variables cambió mucho su relación con TCT dependiendo del año considerado. En ningún caso modelos multivariantes mejoraron los resultados obtenidos con la variable  $\Delta DPV_{n-1}$  med (datos no mostrados).



**Figura 15.** Esquema de cálculo de los intervalos. El esquema representa varios ciclos diarios de la variación del diámetro del tronco (parte superior) y los valores medios de una variable meteorológica (X, barras parte inferior). La TCT del día n es la diferencia entre el diámetro medio del día n+1 menos el del día n. Análogamente, el incremento de una variable meteorológica X del día n es la diferencia entre la X del día n+1 menos la del día n.

En todos los casos, a excepción del año 2013, todas las líneas de regresión pasan por el origen de coordenadas (Tabla 7). En todas las variables, la TCT disminuía en condiciones en las que había un incremento de la demanda evaporativa del ambiente el día anterior (incremento de DPV, incremento de temperatura o disminución de HR). La variación de la TCT fue mucho mayor con  $\Delta DPV_{n-1med}$  que con el resto de variables consideradas. En el caso del  $\Delta DPV_{n-1med}$  la pendiente de la recta varió entre  $-48.6$  hasta  $-65.5 \mu m día^{-1} KPa^{-1}$ , mientras que en el resto varían de  $3.0 \Delta HR_{n-1med}$  en el año 2012 hasta  $-18.8 \Delta T_{n-1med}$  en el año 2010 (Tabla 7).

**Tabla 7.** Resultados de las regresiones lineales entre diferentes variables meteorológicas y la tasa de crecimiento del tronco de árboles (TCT) regados en ausencia de estrés hídrico. Los resultados se agrupan por años y todos se realizaron en la misma parcela con un marco de 7×5m. También se indican los obtenidos en una parcela adyacente de la misma variedad y edad pero a un marco de 7×7. En la Tabla se presentan sólo los resultados obtenidos por el  $\Delta DPV_{n-1}med$  (el incremento de DPV medio del día anterior) y las 3 mejores por orden de coeficiente de significación.  $\Delta HR_{n-1}med$ , incremento de HR medio del día anterior;  $\Delta HR_{n-1}min$ , incremento de HR mínimo del día anterior;  $\Delta HRmed$  incremento de HR medio;  $\Delta T_{n-1}med$ , incremento de T medio del día anterior;  $\Delta T_{n-1}max$ , incremento de T máximo del día anterior

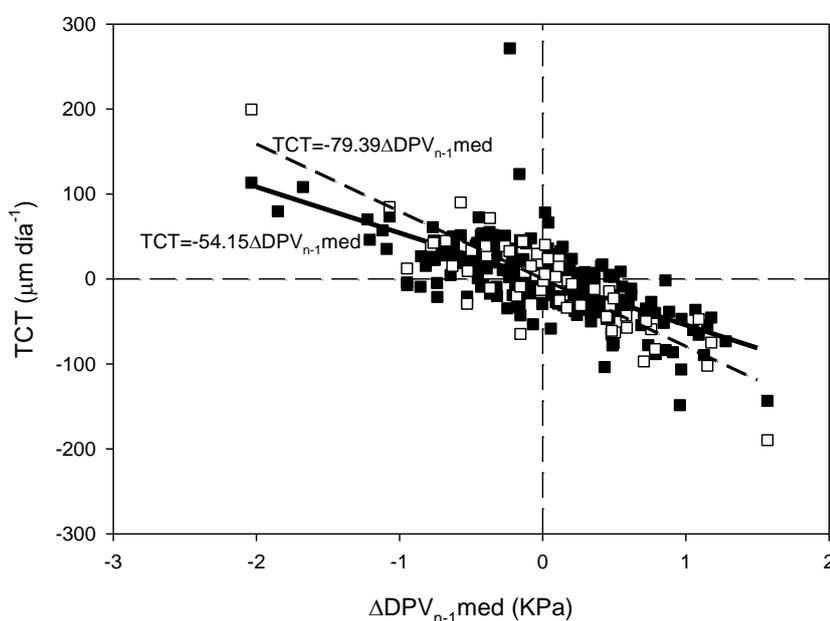
Variable	n	R <sup>2</sup>	Error Estándar	Ecuación
<b>2010 Parcela 7×5 DDA 166-235</b>				
$\Delta DPV_{n-1}med$	70	0,34***	42,4µm	TCT=-48,6 $\Delta DPV_{n-1}med$
$\Delta T_{n-1}med$	70	0,40***	40,1µm	TCT=-18,8 $\Delta T_{n-1}med$
$\Delta T_{n-1}max$	70	0,27***	44,7µm	TCT=-9,2 $\Delta T_{n-1}max$
$\Delta HR_{n-1}med$	70	0,20**	46,7µm	TCT=2,1 $\Delta HR_{n-1}med$
<b>2012 Parcela 7×5 DDA 173-232</b>				
$\Delta DPV_{n-1}med$	60	0,61***	24,8µm	TCT=-50,8 $\Delta DPV_{n-1}med$
$\Delta HR_{n-1}med$	60	0,52***	27,3 µm	TCT=3,0 $\Delta HR_{n-1}med$
$\Delta HR_{n-1}min$	60	0,36***	31,6 µm	TCT=2,2 $\Delta HR_{n-1}min$
$\Delta T_{n-1}max$	60	0,31***	32,8 µm	TCT=-8,0 $\Delta T_{n-1}max$
<b>2013 Parcela 7×5 DDA 176-233</b>				
$\Delta DPV_{n-1}med$	58	0,61***	21,8 µm	TCT=-65,5 $\Delta DPV_{n-1}med$
$\Delta T_{n-1}med$	58	0,29***	28,8 µm	TCT=18,7-13,5 $\Delta T_{n-1}med$
$\Delta HR_{n-1}med$	58	0,27***	29,3µm	TCT=18,0+2,3 $\Delta HR_{n-1}med$
$\Delta HRmed$	58	0,24***	30,0µm	TCT=17,9+2,14 $\Delta HRmed$
<b>2014 Parcela 7×5 DDA 168-236</b>				
$\Delta DPV_{n-1}med$	69	0,47***	28,5 µm	TCT=-63,1 $\Delta DPV_{n-1}med$
$\Delta HR_{n-1}med$	69	0,39***	30,5 µm	TCT=2,8 $\Delta HR_{n-1}med$
$\Delta T_{n-1}med$	69	0,38***	31,0 µm	TCT=-15,2 $\Delta T_{n-1}med$
$\Delta T_{n-1}max$	69	0,36***	31,4 µm	TCT=-9,1 $\Delta T_{n-1}max$
<b>2012 Parcela 7×7 DDA 173-232</b>				
$\Delta DPV_{n-1}med$	60	0,75***	28,0µm	TCT=-79,2 $\Delta DPV_{n-1}med$
$\Delta HR_{n-1}med$	60	0,53***	38,0 µm	TCT=4,3 $\Delta HR_{n-1}med$
$\Delta T_{n-1}med$	60	0,48***	39,9 µm	TCT=-20,3 $\Delta T_{n-1}med$
$\Delta T_{n-1}max$	60	0,47***	40,5 µm	TCT=-13,7 $\Delta T_{n-1}max$

Los ajustes realizados en una parcela adyacente con la misma edad pero a un marco más amplio (parcela 7×7, Tabla 7) muestran los mismos resultados anteriores, siendo la variable  $\Delta DPV_{n-1}med$  la que mejor ajuste presentó. En esta parcela las diferencias en las pendientes de la regresión son mucho mayores, con un valor más de 4 veces superior empleando  $\Delta DPV_{n-1}med$  que en el resto. La capacidad de predicción también mejoró con los datos de esta parcela en todas las variables, siendo el coeficiente de determinación de la

variable  $\Delta DPV_{n-1,med}$  el mayor. Los resultados obtenidos en esta parcela suponen que el 75% de la variabilidad de la TCT estuvo explicado por las variaciones en el DPV medio del día anterior.

#### Variaciones interanuales de la influencia ambiental en la TCT

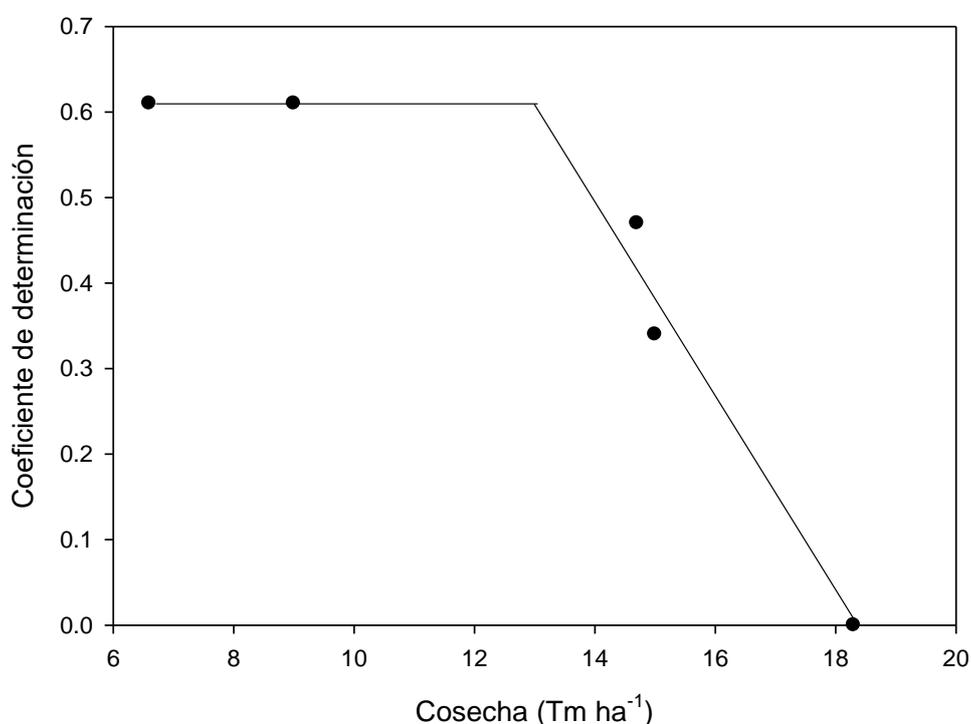
Las diferencias entre las regresiones, de los diferentes años, obtenidas en la parcela de 7x5 en la relación con  $\Delta DPV_{n-1,med}$  (Tabla 7) no fueron significativamente diferentes (Figura 16). La ecuación global predice hasta un 45% de la variabilidad presentada en los 5 años de datos.



**Figura 16. Relación entre la tasa de crecimiento del tronco (TCT) y el incremento de DPV media del día anterior ( $\Delta DPV_{n-1,med}$ ). Cuadrados negros y línea entera representa a todos los datos de la parcela de 7x5 (Tabla 7,  $n=257$ ,  $TCT=-54.15\Delta DPV_{n-1,med}$ ,  $R^2=0.46^{***}$ ,  $Error=31.0 \mu m \text{ día}^{-1}$ ). Cuadrados blancos y línea discontinua representan a los datos de la parcela 7x7 (Tabla 7,  $n=60$ ,  $TCT=-79.39 \Delta DPV_{n-1,med}$ ,  $R^2=0.75^{***}$ ,  $Error=27.8 \mu m \text{ día}^{-1}$ )**

Esta ecuación global tiene una pendiente que sugiere una variación importante de la TCT por efecto de la variación del DPV del día anterior, alrededor de  $55 \mu m \text{ día}^{-1}$  por cada KPa. La ecuación global fue significativamente diferente de la de la parcela 7x7 (Figura 16). Las diferencias significativas persisten incluso si la comparación se realiza entre las dos parcelas pero sólo con los datos del año 2012 (Tabla 7). No obstante la parte donde se encuentran la mayor parte de los datos (en el intervalo  $\pm 1 KPa$ ) podría estar representada por la ecuación general (Figura 16).

A pesar de la ausencia de diferencias significativas, hay una clara tendencia de una mayor influencia del DPV en los años con una carga moderada (2012 y 2013), frente a los años con mayor carga (2010 y 2014). En los dos primeros años el coeficiente de determinación de la regresión entre TCT frente a DPV fue de 0.61, mientras que en 2010 y 2014 los valores fueron de 0.34 y 0.47, respectivamente (Tabla 7). La relación entre el coeficiente de determinación de la mencionada regresión frente a la cosecha obtenida (Figura 17) sugirió una menor influencia del DPV con el incremento de la cosecha a partir de 13.0 Tm ha<sup>-1</sup>, llegando a ser nula si se incluyen los datos obtenidos en el año 2008 con una cosecha record en la parcela.



**Figura 17.** Relación entre el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de las regresiones entre el DPV medio del día anterior  $\Delta DPV_{n-1,med}$  y la TCT (Tabla 7) y la cosecha registrada en la parcela Control. La línea representa una estimación de la posible evolución.

### 5.1.2 DISCUSIÓN

#### *Líneas Base de la MCD*

La relación entre la MCD y el potencial hídrico de tronco medido al mediodía ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) fue similar al descrito en la literatura (olivo, Moriana et al., 2000; otros frutales, Ortuño et al., 2010). En ausencia de estrés hídrico, valores inferiores a -1.4 MPa, los valores para la relación entre la *señal* MCD y  $\Psi_{\text{tronco}}$  se agruparon en torno a 1, mientras que en la relación MCD vs  $\Psi_{\text{tronco}}$  estos valores tuvieron una mayor dispersión. Estos resultados sugieren que la *señal* MCD reduciría el efecto ambiental en el rango cercano a -1.4 MPa que según Pérez-López et al. (2013) sería la mayor fuente de variación en este rango.

La carga de fruta fue un factor que afectó a la relación entre la *señal* MCD y  $\Psi_{\text{tronco}}$ . Las condiciones de ausencia de estrés hídrico o con niveles de estrés muy bajos ( $\Psi_{\text{tronco}}$  mayores de -1.6 MPa) en años de bajo nivel de carga dieron lugar a valores de *señal* MCD mayores de los esperados ( $> 1$ , Figura 12). La carga de fruta parece ser un factor que afecta a los valores de MCD. En olivo, Moriana et al. (2011) mostraron diferencias significativas en la pendiente de las líneas base de MCD con DPV y Temperatura, entre los años con altos niveles y años con bajos niveles de cosechas. Goldhamer y Fereres (2001) sugirieron en almendro que el crecimiento activo del tronco disminuye los valores de la MCD en frutales. Esta situación es la misma que tiene lugar en olivo en un año de descarga. Sin embargo, no se encontraron valores menores de los esperados en la relación MCD vs  $\Psi$  en el año de descarga (Figuras 11). Por lo tanto, ya que la *señal* MCD es un cociente entre la MCD medida y la estimada por la línea base, este resultado indicaría una estimación de los valores MCD menor de la esperada para condiciones de ausencia de estrés hídrico. Esto supone que la estimación de la línea base al comienzo de una estación de baja carga según la metodología de Corell et al. (2013) podría subestimar estos valores y dar lugar a este incremento de la *señal* MCD.

La relación entre los valores del percentil 90 de la *señal* MDC y  $\Psi_{\text{tronco}}$  mostró un claro incremento de la *señal*, en el intervalo de -0.5 y el máximo valor, -1.6 MPa, (Figura 14). Este incremento fue también observado en la relación de los valores del percentil 90 de MCD vs  $\Psi_{\text{tronco}}$ , aunque el incremento fue hasta alcanzar un máximo algo menor que el anterior, -2.0 MPa, (Figura 13). Ambas relaciones, presentaron un descenso de *señal* MCD y MCD en un rango parecido -2 y -1.6 MPa respectivamente. Esta caída de la contracción máxima del tronco podría estar relacionada con un aumento de la cavitación o entrada de aire en los vasos del xilema, disminuyendo así la capacidad del transporte hídrico a través del xilema,

manifestándose en un descenso de MCD. Torres-Ruiz et al. (2013) determinaron en olivos de esta misma parcela, por medio de la curva de vulnerabilidad, el parámetro de Presión de entrada de aire (Pe) en -1.3MPa, punto a partir del cual el porcentaje de pérdida de la conductividad hidráulica aumenta rápidamente. Pudiera ser que la respuesta más tardía de la MCD (-2 MPa) al descenso del  $\Psi_{\text{tronco}}$  se deba al control estomático que limita la transpiración para evitar riesgo en la funcionalidad hidráulica (Fernández et al., 1997; Tognetti et al., 2009; Boughalleb y Hajlaoui, 2011), pero llegado este nivel de  $\Psi_{\text{tronco}}$ , ese mecanismo deja de ser tan efectivo, provocando un rápido aumento del porcentaje de pérdida de la conductividad hidráulica que se ve reflejado en una caída de los valores máximos de MCD representados en las Figuras 13 y 14. Este patrón de incremento y disminución fue observado en olivo (Moriana et al. 2000) y en otros frutales (Ortuño et al. 2010). Lo que supone una zona de “incertidumbre” donde valores muy diferentes de  $\Psi$ , dan lugar a valores similares de *señal* MCD y MCD y limita la utilidad de la MCD en olivo (Moriana y Fereres, 2002; Moriana et al. 2003; Moriana et al., 2010; Fernández et al. 2011). Aunque este patrón también aparece en la *señal* MCD, los valores superiores a 1.1 siempre indicaron condiciones de estrés hídrico (Figura 12). Sin embargo, los valores de la *señal* MCD en este intervalo (de -1.4 a -2 MPa) no presentaron un incremento lineal por la disminución de la *señal* MCD, Por lo tanto, en el intervalo 1.1-1.4 de *señal* MCD un valor superior no necesariamente supone un mayor nivel de estrés.

#### *Influencia ambiental en el indicador TCT*

La variación del diámetro del tronco es una medida fisiológica compleja que está relacionada con multitud factores (Genard et al., 2001) lo que supone que los ciclos diarios pueda ser el compendio, en alguno de sus indicadores, de diferentes respuestas fisiológicas. Los diferentes modelos que han intentado relacionar las curvas diarias con el clima han tenido resultados inciertos por el efecto superpuesto de crecimiento y estado hídrico (Deslauriers et al., 2007). Coccozza et al. (2012) en olivos jóvenes sugiere la influencia de la temperatura y la ETo en la evolución de los diámetros máximos aunque no encuentran una explicación clara a los cambios interanuales en las fases que transcurren durante el verano. El análisis de los diámetros máximos no es el parámetro más adecuado para describir el estado hídrico en olivar (Moriana y Fereres, 2002) y posiblemente hubiese sido más preciso este trabajo analizando los indicadores por separado. El análisis de los indicadores obtenidos de las curvas diarias es, por el contrario, más prometedor en la bibliografía. La máxima contracción del diámetro del tronco (MCD) se relaciona en gran medida con la transpiración de la planta en diferentes

especies (Ortuño et al., 2010), incluida el olivar (Morianana et al., 2010; Cocozza et al., 2012) pero no ocurre lo mismo con la tasa de crecimiento del tronco (TCT). Los datos del presente trabajo indican que la relación de la TCT con las variables climatológicas es pobre en olivar. Este resultado es común en la bibliografía. En algunas especies forestales se ha descrito una relación negativa entre la temperatura y la tasa de crecimiento (Bouriaud et al., 2005 en *Picea abies*; Tardif et al., 2001 en varias especies forestales). Por el contrario, Pérez-López et al. (2008) describe una relación de tipo parabólica entre la TCT y la temperatura en olivares jóvenes con crecimiento del tronco activo durante toda la estación.

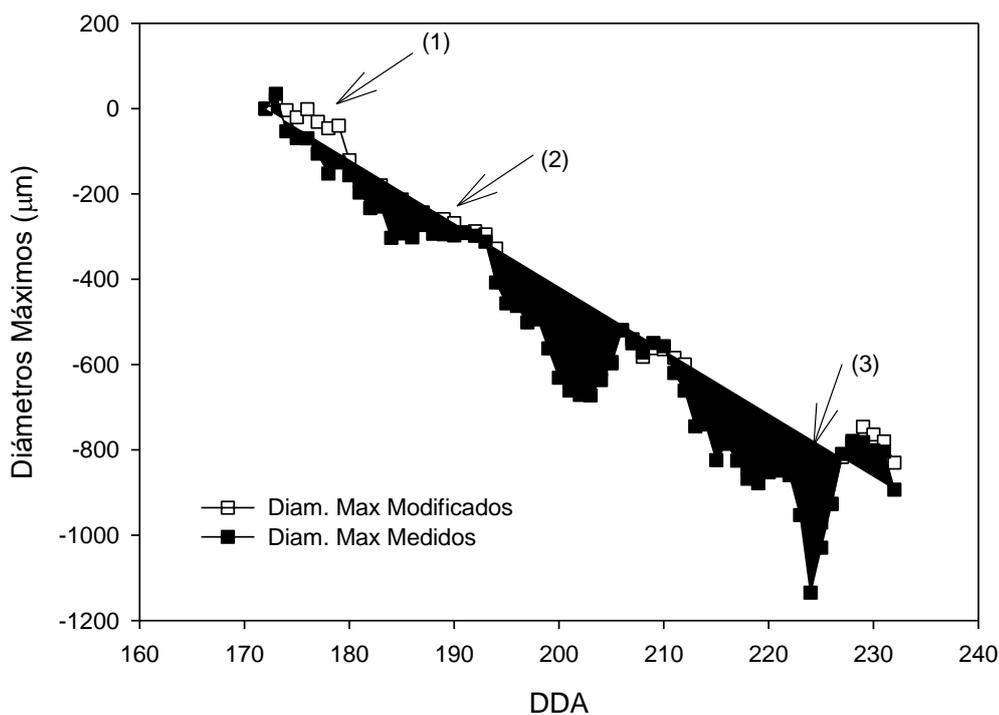
El valor de la TCT es, en realidad, un efecto sobre el ciclo diario de expansión y contracción. Deslauriers et al. (2007) sugieren que la duración de la fase de rehidratación, durante la tarde-noche, es un componente de gran importancia en la determinación de la TCT y apuntan que los resultados contradictorios de temperatura son debidos a su efecto en esta variable. Deslauriers et al. (2007) comparan especies y épocas del año muy diferentes en los que la duración de esta fase presenta un rango muy amplio. En las condiciones del presente trabajo, la duración de la rehidratación al final del día es muy similar a lo largo del ciclo. Fernández et al. (2011) no encontraron una influencia clara de la duración de las fases sugeridas por Deslauriers et al. (2007) en la variación del diámetro del tronco a lo largo de una estación en el mismo olivar donde se ha desarrollado el presente experimento. Es probable que la evolución de la TCT, al menos durante la fase de endurecimiento del hueso, refleje diferentes respuestas fisiológicas lo que dificulta su monitorización. No obstante los resultados indican que el efecto del DPV podría ser importante, aunque su influencia varía entre estaciones. El olivo es una especie en la que, incluso en condiciones de ausencia de estrés, la demanda evaporativa tiene una gran influencia tanto en el ciclo diario (Xiloyannis et al., 1988) como en las variaciones entre días (Morianana et al., 2002) de la conductancia estomática. Teniendo en cuenta que el tronco actúa como un almacén de agua para el resto de la planta es probablemente exista un efecto diferido de las condiciones climatológicas que influyan, parcialmente, en el desarrollo del ciclo del día siguiente. Algún tipo de señal generada por las variaciones de DPV podría dar lugar a cambios en la disponibilidad de agua en el tronco y afectar a los valores de TCT. Un ejemplo similar es el caso de la señal de raíz descrita en varias especies entre ellas olivo (Fernández et al., 2006). En este caso una señal de tipo hidráulico (Yao et al., 2006), químico (Gowing et al., 1990) o una interacción de ambos (Tardieu Davies, 1992) provocan un cambio en el intercambio gaseoso.

La gran variabilidad entre años en la influencia del DPV en los valores de TCT podría estar ligada a múltiples factores que sería de interés identificar. El número de datos empleados

en este trabajo no permite obtener conclusiones definitivas. No obstante, un nivel de carga por encima de lo habitual (Tabla 6) parece que disminuiría la influencia del DPV (Figura, 17). El record de producción en esta parcela tuvo lugar el año 2008 con 18.3 Tm ha<sup>-1</sup>, en este caso ninguna variable climatológica se ajustó a la TCT (Tabla 7). El fruto es un gran sumidero de nutrientes y agua en olivo durante el endurecimiento de hueso (Rallo y Suárez, 1989). Estos resultados podrían indicar que la gran demanda del fruto minimizaría el efecto ambiental, provocando valores anormalmente pequeños de TCT. En esta parcela los años con más de 14 Tm ha<sup>-1</sup> (2008, 2010 y 2014) la TCT media de árboles Control en Fase II fue de -5,2, -2,6 y -6,5  $\mu\text{m día}^{-1}$ , mientras que en los años con cosechas medias (2012 y 2013) la TCT fue de 2,6 y 1,6  $\mu\text{m día}^{-1}$ .

#### *Manejo de la influencia ambiental en los datos de la TCT*

Las variaciones del DPV afectaron parcialmente a los valores de la TCT en ausencia de estrés hídrico. Esta influencia podría inducir a errores en el manejo del riego basado en este parámetro. No es preciso modelizar en base a parámetros climatológicos este indicador para poder mejorar la toma de decisiones basadas en la TCT. El uso de una metodología que eliminase, al menos en parte, esta influencia podría ser suficiente. Moriana et al. (2010) sugirió en olivo la diferencia entre la TCT medida y la TCT de árboles control como posible indicador. Sin embargo, este parámetro no elimina la influencia del medio ya que la TCT de árboles bien regados tendría otros factores que están influyendo. Por el contrario, si asumimos una influencia media del ambiente como la simulada en la Figura 16 sería posible, sin árboles de referencia, eliminar parte de las variaciones no debidas al déficit hídrico. La Figura 18 presenta la evolución de los diámetros máximos medidos del tratamiento deficitario 2 (RDC 2) durante la campaña 2012 y ese mismo parámetro empleando la TCT calculada como la diferencia entre la TCT medida y la TCT debida al DPV (estimada con la ecuación de la Figura 6).



**Figura 18.** Evolución del diámetro máximo del tratamiento RDC 2 durante la fase de endurecimiento de hueso del año 2012 (cuadrados negros). La medida modificada de la TCT según la ecuación de la Figura 2 da lugar a la evolución de diámetros máximos de los cuadrados blancos. Las notaciones (1), (2) y (3) muestran, a modo de ejemplo, tres momentos en los que la programación del riego en función de la TCT hubiesen sido diferentes.

Esta corrección permite que aquellos días en los que haya un incremento del DPV que da lugar a una disminución de la TCT independientemente del estado hídrico, se atenuase en parte con la corrección sugerida (por ejemplo en la situación 1, Figura 18). A la inversa, fechas en las que el DPV disminuya entre días y que den lugar a recuperaciones parciales (situación 2, Figura 18), la corrección indica que el estrés se sigue produciendo con la misma intensidad. Por último, casos en los que las condiciones de estrés sean severas y den lugar a una disminución de la TCT (situación 3, Figura 18) puede verse acrecentadas en el caso de periodos con incremento de DPV, lo que atenúa la corrección dándonos una visión más precisa del nivel de estrés al que se ve sometida la planta.

Estos ajustes de la TCT no dan lugar a grandes variaciones en la figura de diámetros máximos (Figura 18), ni han dado lugar a cambios significativos en los parámetros basados en este indicador que se presentan en el siguiente capítulo de la presente tesis. No obstante, su uso es probable que permita un control del riego más preciso y atenúe el efecto de “falsos positivos” que indiquen condiciones de estrés muy severas.

## 5.2 CONCLUSIONES

En los tres años de estudio, la respuesta de la MCD y la *señal* MCD frente al  $\Psi_{\text{tronco}}$  medido al medio día fue similar, mostrando una dispersión elevada que dificulta el uso para la programación del riego en olivo. Sin embargo, la *señal* MCD estimada según Corell et al. (2013) en ausencia de estrés hídrico, para valores inferiores de  $-1.4 \text{ MPa } \Psi_{\text{tronco}}$ , redujo la dispersión entre la relación *señal* MCD y  $\Psi_{\text{tronco}}$  donde se agruparon entorno a un valor de *señal* 1.

Al considerar la respuesta máxima de ambos indicadores, percentil 90, frente al potencial, se encontró un buen ajuste en una relación curvilínea de tercer grado, que mostró un incremento progresivo de los valores de MCD y *señal* MCD con la disminución de  $\Psi_{\text{tronco}}$  hasta valores alrededor de  $-2 \text{ MPa}$  y  $-1,6 \text{ MPa}$  respectivamente. Este patrón de incremento y disminución supone una zona de “incertidumbre” donde valores muy diferentes de  $\Psi_{\text{tronco}}$ , dan lugar a valores similares de *señal* MCD y MCD. Esta zona de incertidumbre podría llegar hasta valores cercanos a  $-3 \text{ MPa}$  de acuerdo al ajuste encontrado lo que limita la utilidad de ambos parámetros en el olivo.

No obstante, los valores de *señal* MCD superiores a 1,1 correspondieron a valores superiores a  $-1,4 \text{ MPa}$  lo que indica que este parámetro podría ser de utilidad incluso en esta zona de incertidumbre. Debido a la relación entre este parámetro y el potencial hídrico lo que no se puede asegurar en este intervalo de potencial hídrico es que el aumento de la *señal* MCD indique mayores niveles de estrés hídrico.

La carga de fruta fue un factor que afectó a la relación entre la *señal* MCD y  $\Psi_{\text{tronco}}$ . Los años con bajos niveles de carga de fruta y condiciones de ausencia de estrés hídrico o con niveles de estrés bajos ( $\Psi_{\text{tronco}}$  mayores de  $-1.6 \text{ MPa}$ ) dieron lugar a valores de *señal* MCD mayores de los esperados. Por ello, la metodología la línea base propuesta por Corell et al. (2013) al comienzo de una estación de baja carga, podría subestimar los valores y dar lugar a este incremento de la *señal* MCD.

El estudio de las relaciones de la TCT con las distintas variables climáticas durante el período del endurecimiento masivo del hueso mostró unos resultados pobres durante los años de estudio. Sólo al considerar el incremento del día anterior de las variables HR, T y DPV se consigue una significativa mejora que podría explicar parte de las variaciones obtenidas en la

TCT. Es muy relevante que este efecto ambiental se pierde cuando los niveles de carga en el árbol son muy elevados.



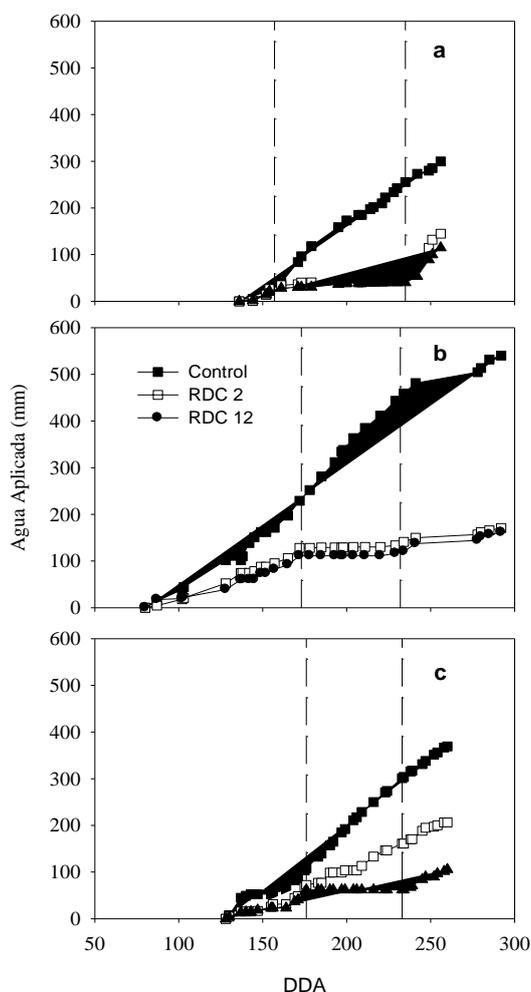
## 6 CAPITULO 3. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN ACEITUNA DE MESA BASADO EN MEDIDAS DE VARIACIÓN DEL DIÁMETRO DEL TRONCO.

### 6.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 6.1.1 RESULTADOS

##### *Relaciones hídricas*

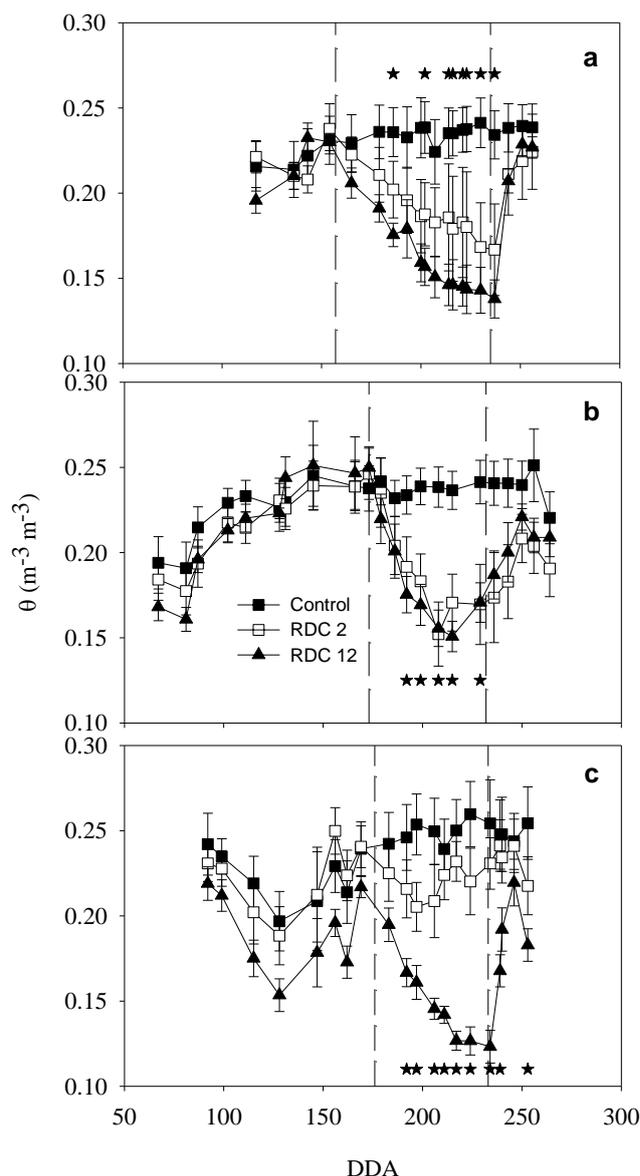
Los diferentes tratamientos planteados dieron lugar a una evolución del agua aplicada que cambió entre tratamientos y años (Figura 19). En los tres años el tratamiento Control tuvo una aplicación de agua con un patrón estacional muy similar.



**Figura 19.** Evolución del agua aplicada durante los tres años de experimento (a) 2011 (b) 2012 (c) 2013. Las líneas verticales indican el periodo de endurecimiento masivo del hueso durante los 3 años.

Los árboles Control recibieron el agua de riego prácticamente a una tasa constante, al menos durante el verano. Los valores de agua aplicada al final de cada año fueron muy superiores en el tratamiento Control (299 mm en 2011; 540 mm en 2012; 369 mm en 2013) a los obtenidos en los tratamientos deficitarios. La mayor cantidad de agua empleada durante el año 2012 estuvo relacionada con un año más seco y un periodo de riegos más amplio. Mientras que en los años 2011 y 2013 se registró una pluviometría anual de 521 y 418 mm respectivamente, en el 2012 fue de 302 mm. Los tratamientos deficitarios fueron muy similares en los años 2011 y 2012 con una ausencia prácticamente total de riego durante la fase de endurecimiento del hueso. En estos dos años los valores finales de agua aplicada fueron similares entre ambos tratamientos (145 RDC-2 y 115 mm RDC-12 en 2011 y 171 RDC-2 y 161 mm RDC-12 en 2012). Durante el año 2013 se cambió el protocolo de riego del tratamiento RDC-2 lo que dio lugar a un cambio en el patrón de agua aplicada. El tratamiento RDC-2 recibió riego durante la fase de endurecimiento del hueso aunque a una tasa inferior a la del Control. Esto supuso que las cantidades finales de riego fueran claramente diferentes entre los tratamientos deficitarios (207 mm RDC-2 y 106 mm RDC-12)

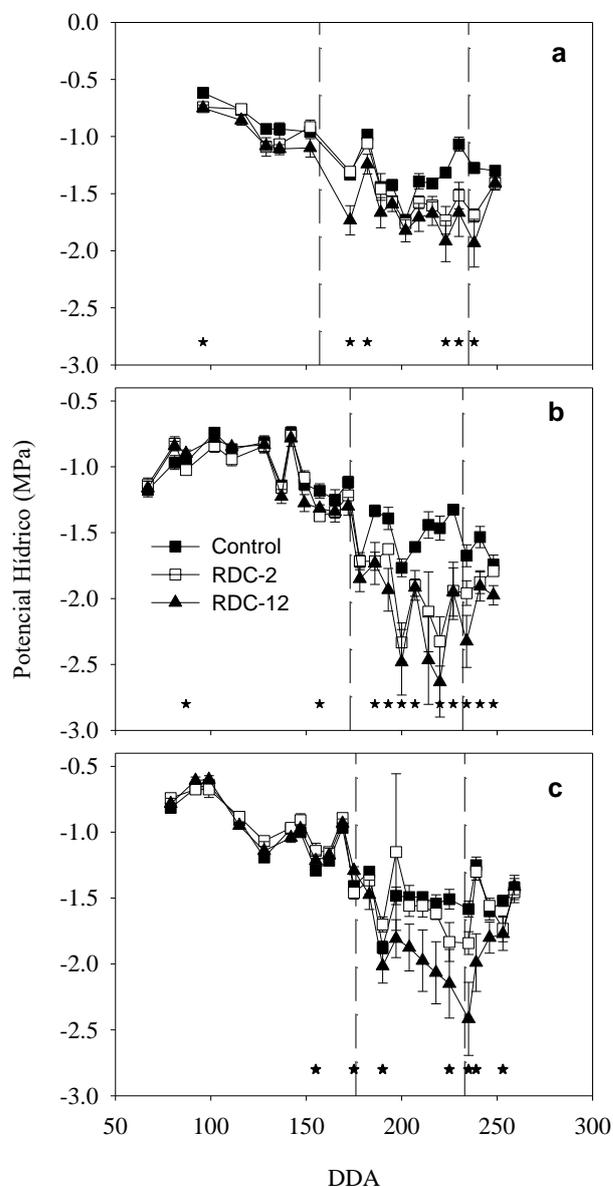
Los tratamientos de riego dieron lugar a diferencias claras en el contenido de agua en el suelo en los tres años del experimento, que solamente fueron significativas durante la fase de endurecimiento masivo del hueso (Figura 20). Los contenidos de agua en el suelo de las parcelas Control se incrementaron ligeramente desde el comienzo de cada año hasta la fase de endurecimiento de hueso, estando todas las estaciones a unos niveles de humedad similares. En los dos primeros años los valores de los tratamientos deficitarios no fueron significativamente diferentes y estuvieron muy cercanos (Figuras 20a y b). Sin embargo, el cambio de estrategia de riego durante el año 2013 supuso que el tratamiento RDC-2 fuera muy similar al Control y sin diferencias significativas entre ellos (Fig. 2 c). Mientras que el tratamiento RDC-12 presentó incluso una clara tendencia a valores inferiores durante la fase I. Estas diferencias entre los tratamientos deficitarios en el año 2013 fueron significativas durante el endurecimiento del hueso. Sólo durante el año 2013 hubo diferencias en este parámetro al final del experimento.



**Figura 20.** Evolución del contenido de agua en el suelo (0-1 m de profundidad) durante los tres años de experimento (a) 2011 (b) 2012 (c) 2013. Cada punto es la media de 6 datos. Las barras verticales representan el error estándar. Las líneas verticales indican el periodo de endurecimiento masivo del hueso durante las 3 estaciones. Los asteriscos indican diferencias significativas en la fecha en la que aparecen ( $p < 0.05$ , Test de Tukey).

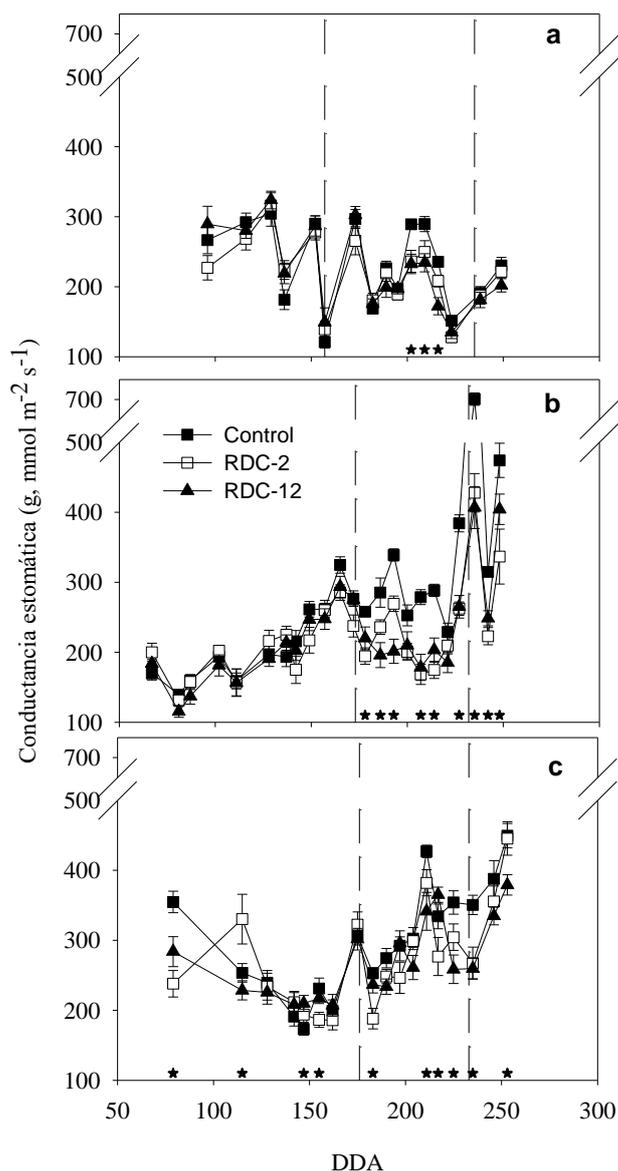
Estas variaciones en el contenido de agua en el suelo dieron lugar a cambios en la fisiología de la planta. Los datos de potencial hídrico muestran claras diferencias entre estaciones de riego en cuanto a los niveles de estrés obtenidos (Figura 21). Los valores de los árboles Control se mantuvieron similares en los tres años, alrededor de  $-1.5$  MPa. Las diferencias significativas se obtuvieron especialmente durante la fase de endurecimiento de hueso y se observaron entre los tratamientos Control y RDC-12. El tratamiento RDC-2 fue estadísticamente intermedio pero en los años 2011 y 2012 estuvo mucho más cercano a RDC-

12 que a Control (Figura 21 a y b). Sin embargo, durante el año 2013 el cambio en la programación dio lugar a valores muy similares entre RDC-2 y Control, solamente al final del periodo de estrés hídrico hubo una caída no significativa (Figura 21 c).



**Figura 21.** Evolución del potencial hídrico en hoja medido al mediodía durante los tres años de ensayo (a) 2011 (b) 2012 (c) 2013. Cada punto es la media de 6 datos. Las barras verticales representan el error estándar y las líneas verticales la fase de endurecimiento masivo del hueso. Los asteriscos indican diferencias significativas en la fecha en la que aparecen ( $p < 0.05$ , Test de Tukey).

El intercambio gaseoso se vio también afectado de manera similar al potencial hídrico (Figura 22). Los valores y diferencias entre tratamientos en el año 2011 tendieron a ser menores, incluso en los árboles Control, que en los otros dos años.

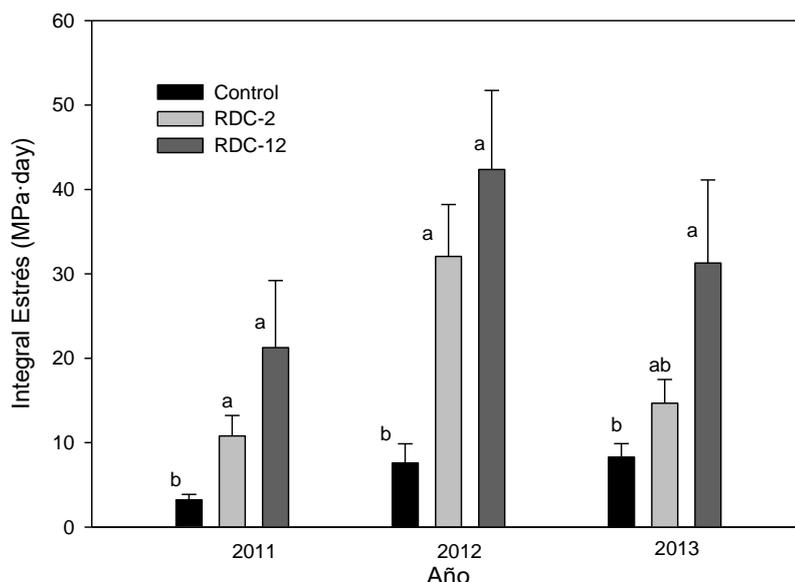


**Figura 22.** Evolución de la conductancia estomática máxima durante los tres años de ensayo (a) 2011 (b) 2012 (c) 2013. Cada punto es la media de 12 datos. Las barras verticales representan el error estándar y las líneas verticales la fase de endurecimiento masivo del hueso. Los asteriscos indican diferencias significativas en la fecha en la que aparecen ( $p < 0.05$ , Test de Tukey).

Al igual que en el potencial hídrico la mayor parte de las diferencias significativas se observaron entre los tratamientos Control y RDC-12. Sin embargo, en este indicador el tratamiento RDC-2 siempre terminó siendo significativamente menor que el Control al final del periodo de estrés hídrico en los tres años de experimento. La recuperación sólo fue completa, según este parámetro, en el año 2011 donde las diferencias fueron menores. En el año 2012, el de mayor nivel de estrés hídrico, los valores de conductancia estomática se incrementaron respecto a 2011 en el tratamiento Control, pero en los dos tratamientos deficitarios estuvieron por debajo del Control de manera significativa. En cambio en el año

2013, aunque la velocidad de recuperación de este parámetro fue similar en los dos tratamientos deficitarios, solamente el tratamiento RDC-2 consiguió llegar a los valores obtenidos en el tratamiento Control.

Las diferencias en el nivel de estrés hídrico entre los diferentes años aparecen especialmente bien reflejadas en el cálculo de la integral de estrés (Figura 23). Los datos del 2011, incluso en el tratamiento Control, son inferiores a los de los otros dos años.

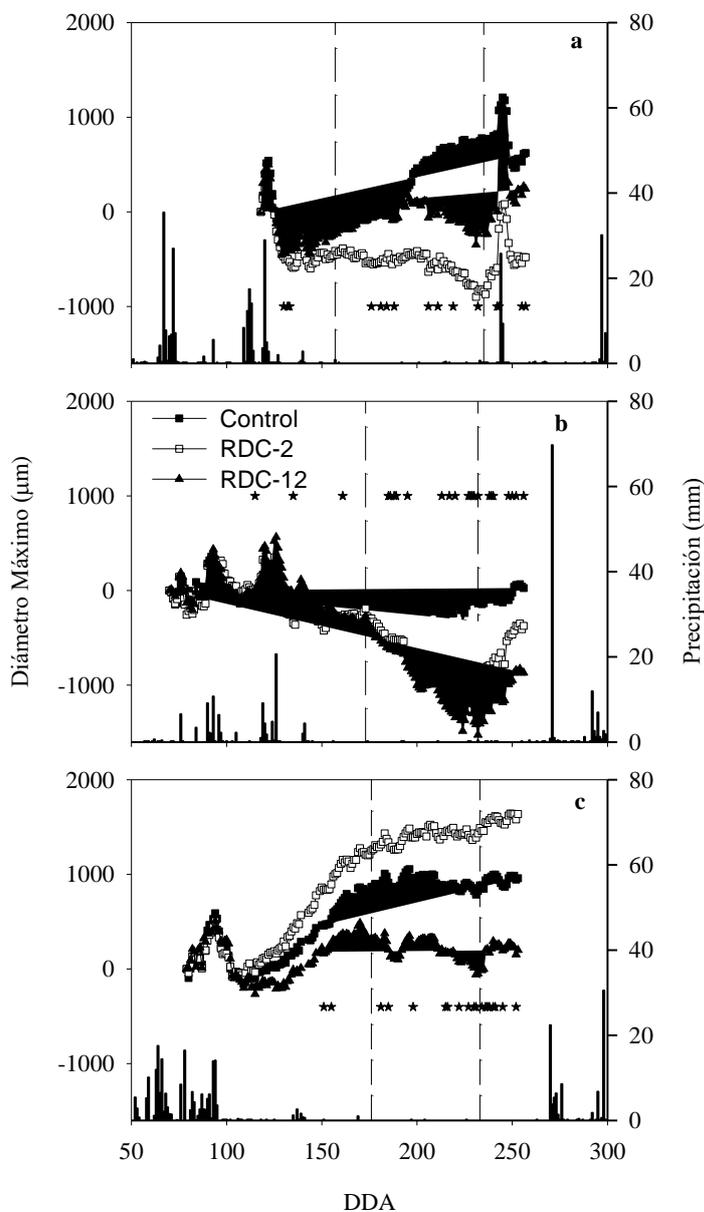


**Figura 23.** Integral de estrés en la fase de endurecimiento masivo de hueso durante los tres años en los que se llevó a cabo el experimento. Cada histograma es la media de 6 datos y las barras verticales representan el error estándar. Letras diferentes en el mismo año indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ , Test de Tukey).

El tratamiento Control tuvo valores inferiores a 10 MPa·día en los tres años de estudio. Los tratamientos deficitarios en ningún caso fueron significativamente distintos entre ellos, aunque tuvieron valores sensiblemente inferiores en el RDC-2 respecto a RDC-12. En los años 2011 y 2013 los valores de RDC-2 fueron ligeramente superiores a 10 MPa·día (10.8 y 14.6 MPa·día, respectivamente), mientras que los de RDC-12 fueron aproximadamente el doble (21.3 y 31.3 MPa·día, respectivamente). El año 2012, con un nivel de estrés hídrico más elevado, los valores de RDC-2 se incrementaron llegando hasta 32.1 MPa·día, el tratamiento RDC-12 obtuvo también el máximo con un 30% más (42,4 MPa·día).

La tasa de crecimiento del tronco (TCT) es un parámetro cuya representación gráfica es poco clara, por lo que para caracterizar su evolución emplearemos los diámetros máximos (Figura 24). La pendiente de los diámetros máximos es la TCT, cuyos valores medios por

estados fenológicos aparecen en la Tabla 8. En la Figura 24 se indican aquellas fechas en las que la TCT fue significativamente diferente entre tratamientos.



**Figura 24.** Evolución de los diámetros máximos del tronco durante los tres años de experimentos (a) 2011 (b) 2012 (c) 2013. Cada punto es la media de 6 datos. Las líneas verticales indican el periodo de endurecimiento del hueso. Las barras verticales indican eventos de lluvia (eje de la derecha). Los asteriscos indican diferencias significativas en la tasa de crecimiento del tronco (TCT), pendiente de los gráficos de esta figura.

El patrón estacional de los diámetros máximos es muy característico y muy dependiente del nivel de carga. En ausencia de estrés hídrico y condiciones de baja carga de fruta (como es el caso del tratamiento Control en el año 2011) el patrón estacional es de crecimiento continuo desde el inicio (la TCT es siempre positiva) con un incremento en los valores de TCT al final del endurecimiento de hueso (Figura 24a, Tabla 8). La ausencia de un

crecimiento mayor durante la fase I del año 2011 estuvo relacionada posiblemente con las lluvias que provocaron un aumento brusco del diámetro del tronco y, especialmente, una gran disminución en los días posteriores a la lluvia, que impidieron el uso de este indicador durante un periodo prolongado de tiempo. El incremento del nivel de carga, como es el caso de los años 2012 y 2013, hace que cambien de forma clara este patrón estacional en el tratamiento Control (Figura 24b y c, Tabla 8). La curva de diámetros máximos esperada en ambos años es la que se obtuvo durante el año 2013 (Figura 24c) en ella se distinguen de forma clara dos fases, por un lado la fase I de crecimiento activo y valores de TCT positivas y por otro lado la fase de endurecimiento de hueso donde se detiene el crecimiento y los valores de TCT son cercanos a 0. Los valores medios de TCT durante el año 2013 de la fase I en el tratamiento Control fueron mucho mayores que los obtenidos durante la fase II en todos los tratamientos (Tabla 8).

**Tabla 8.** Media de la tasa de crecimiento del tronco (TCT) y error estándar en cada fase fenológica de los tres años. Estos valores son la media de las pendientes de la figura 5 en cada periodo. Los datos de fase I se han obtenido sin considerar los periodos de caída provocados por la lluvia (2011, datos desde DDA 145, 2012 desde DDA 145, 2013 desde DDA 111). El dato de carga es el cociente entre la cosecha del tratamiento Control en cada año y la cosecha media bienal de árboles bien regados del 2008 al 2013 (8.0 MT ha<sup>-1</sup>). Letras diferentes en el mismo periodo fenológico indican diferencias significativas (Test de Tukey p<0.05).

	Carga		TCT media ( $\mu\text{m día}^{-1}$ )		
			Control	RDI-2	RDI-12
2011	30%	Fase I	7.9±5.6	7.3±8.8	16.7±2.2
		Fase II	11.9±4.5	-5.1±3.0	0.2±6.4
		Fase III	14.1±9.1	23.6±12.2	26.8±9.1
2012	83%	Fase I	-2.1±2.3	-2.6±5.5	-6.3±2.7
		Fase II	3.3±3.1a	-14.8±5.7b	-20.7±2.9b
		Fase III	6.1±3.4	31.5±12.4	28.2±7.1
2013	113%	Fase I	15.1±2.5	19.0±4.4	6.2±4.5
		Fase II	1.6±1.2	4.7±2.8	5.9±4.8
		Fase III	3.8±1.9	7.4±3.2	9.8±6.0

En cambio, el patrón estacional obtenido durante el año 2012, a pesar de tener un nivel de cosecha significativo no fue similar al del año 2013, con valores de TCT muy bajos en la fase I (Figura 24b, Tabla 8). Estas diferencias estuvieron relacionadas en gran medida con la lluvia. En ambos años (2012 y 2013), las lluvias durante la fase I supusieron una gran interferencia produciendo rápidos incrementos con posteriores caídas que se prolongaron incluso más de una semana lo que impidió una correcta programación del riego. Sólo durante el año 2013 donde estos eventos de lluvia estuvieron más concentrados, se pudo aplicar un

riego claramente diferencial en fase I lo que repercutió en valores de la TCT claramente diferentes entre RDC 12 y los otros dos tratamientos (Figura 23c y Tabla 8).

El estrés hídrico dio lugar a diferencias significativas entre tratamientos especialmente durante la fase II. En fase I, los valores diarios de TCT sólo fueron diferentes significativamente en fechas aisladas. No obstante, tanto en 2012 como en 2013 las medias de este periodo indican una tendencia a valores menores en los árboles del tratamiento RDC 12 respecto a los otros dos (Tabla 8). Los valores de TCT obtenidos durante la fase II fueron los más afectados por el estrés hídrico en los tres años de ensayo (Figura 24 y Tabla 8). La disminución de la TCT en esta fase fue diferente entre años siendo la mayor en 2012, con valores significativamente diferentes en la media, seguida de 2013 y finalmente 2011 (Tabla 8), una variación similar a la obtenida en los valores de potencial hídrico. Durante el año 2011, la TCT disminuye a partir de la mitad de la fase II y con valores menos negativos que durante 2012 en la que la caída fue casi desde el principio de esta fase (Figura 24, Tabla 8). En ambos años no hubo diferencias significativas entre los tratamientos RDC, ni en los valores diarios ni en la media. El año 2013 fue intermedio entre ambos con una caída que tiene lugar desde el inicio de la fase II pero con una TCT menos negativa y sólo en el caso del tratamiento RDC-12. El cambio de riego en el tratamiento RDC-2 durante el año 2013 supuso que durante la fase II su comportamiento fuese similar al de los árboles Control cuando lo que se pretendía era producir un estrés moderado (Figura 24c).

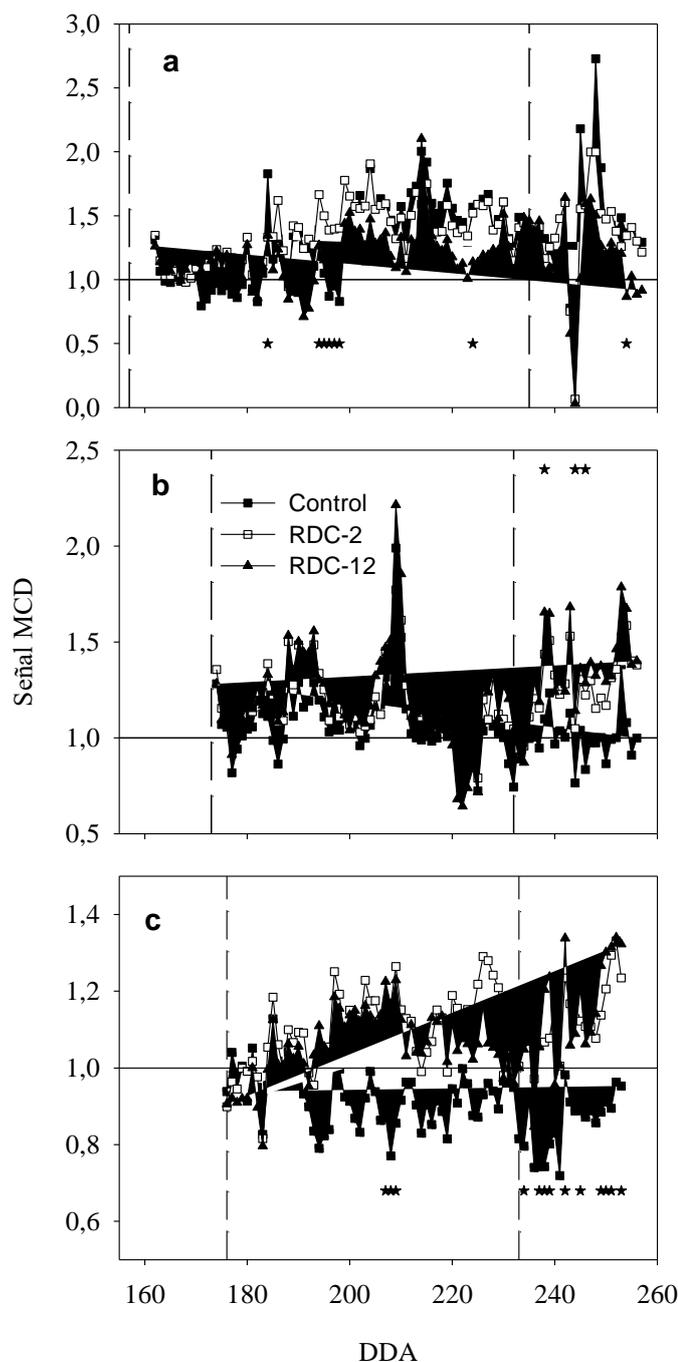
Este comportamiento sugiere que la programación en función de la TCT en este tratamiento dio lugar a “falsos positivos” que supusieron un riego mayor de lo esperado. Estos “falsos positivos” fueron valores de TCT inferiores a  $-10 \mu\text{m día}$ , el umbral seleccionado, pero que no estaban relacionados con periodos reales de estrés hídrico. En todos los años y en distintos tratamientos, incluido el Control, se obtuvieron medidas diarias de TCT muy negativas (Tabla 9) que aparentemente no estuvieron relacionadas con estrés hídrico ya que en todos los casos los valores son de una magnitud similar sin diferencias significativas (a excepción de la fase II de año 2011) aunque es cierto que los tratamientos RDC tienden a valores inferiores.

**Tabla 9.** TCT mínima diaria obtenida en cada estado fenológico durante los tres años de experimento. Durante la fase I se han considerado todos los datos de ese periodo. Letras diferentes en el mismo periodo fenológico indican diferencias significativas (Test de Tukey  $p < 0.05$ ).

		TCT mínima ( $\mu\text{m day}^{-1}$ )		
		Control	RDI-2	RDI-12
<b>2011</b>	<b>Fase I</b>	-168,1±39	-130,2±30	-251,4±49
	<b>Fase II</b>	-130,4±24 a	-199,8±14 b	-199,1±19 b
	<b>Fase III</b>	-129,7±51	-231,4±59	-209,4±50
<b>2012</b>	<b>Fase I</b>	-173,1±51	-183,2±19	-177,7±31
	<b>Fase II</b>	-129,3±21	-194,6±22	-180±2 19
	<b>Fase III</b>	-103,1±18	-128,9±13	-98,9±90
<b>2013</b>	<b>Fase I</b>	-78,2±12	-88,9±18	-130,3±14
	<b>Fase II</b>	-106,2±19	-112,9±14	-108,8±13
	<b>Fase III</b>	-54,1±90	-59,5±60	-84,4±12

El periodo de recuperación anterior a la cosecha también produjo diferencias entre los tratamientos (Figura 24 y Tabla 8). Los valores obtenidos en el tratamiento Control fueron significativamente menores que los de los tratamientos RDC durante algunos días de los tres años en los que se desarrolló el experimento (Figura 24), la media del periodo fue en todos los años mayor en los tratamientos RDC que en el Control (Tabla 8) especialmente el año 2012 aunque estas diferencias no fueron significativas. El incremento en los tratamientos RDC aunque fue claro no fue constante a lo largo del periodo, si no que estuvo relacionado con los días en los que se produjo un evento de riego (Figura 24). Así los datos del 2012, por ejemplo, tienden a ser una línea recta aunque en realidad tiene periodos de paradas o incluso valores negativos (Figura 24b).

La señal de la máxima contracción diaria (señal MCD) fue un parámetro difícil de interpretar (Figura 25) como se ha comentado en el capítulo 2. Los datos de la Figura 25 están referidos solamente a la fase II y III ya que los obtenidos durante la fase I fueron empleados para el ajuste de la línea base. Los árboles Control presentaron claras diferencias entre años (Tabla 3), cuando se hubiese esperado un valor alrededor de 1 en todos los casos. El año 2011 fue el que presentó valores más elevados durante toda la fase II en el tratamiento Control. Esto podría estar relacionado con la poca carga de fruta.



**Figura 25.** Evolución de la señal de máxima contracción diaria durante los tres años de experimentos (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013. Cada símbolo es la media de 6 datos. Los periodos representados en todos los años corresponden a las fases II y III. La señal de estrés se calculó empleando una línea base para cada tratamiento en función de los datos obtenidos al final de la fase I (ver Materiales y Métodos). Los asteriscos representan diferencias significativas en esa fecha ( $p < 0.05$ ; Test de Tukey).

En el caso de los años 2012 y 2013 los valores medios de la señal MCD indican que la estimación tuvo una desviación alrededor del 10% lo que sugiere que el procedimiento de estimación de la MCD de referencia podría ser adecuado (Tabla 10). Sin embargo, es evidente una gran oscilación de los valores diarios que sugieren que aún con el uso de la línea base hay

problemas en la estimación de la MCD óptima. Un ejemplo de que la línea base no corrige todo el efecto ambiental es el periodo 207-212 del año 2012. La gran subida de la señal MCD de todos los tratamientos pudo estar relacionada con una inusual bajada de temperaturas pasando de temperaturas máximas de 32°C (DDA 207) a 27°C (DDA 209) para volver a subir hasta los 35°C (DDA 211) en un periodo de 3 días.

**Tabla 10.** Media y error estándar de la señal MCD promedio en los tres años de experimento en cada estado fenológico considerado. El dato de carga es el cociente entre la cosecha del tratamiento Control en cada año y la cosecha media bienal de árboles bien regados del 2008 al 2013 (8.0 MT ha<sup>-1</sup>). Letras diferentes en el mismo periodo fenológico indican diferencias significativas (Test de Tukey p<0.05).

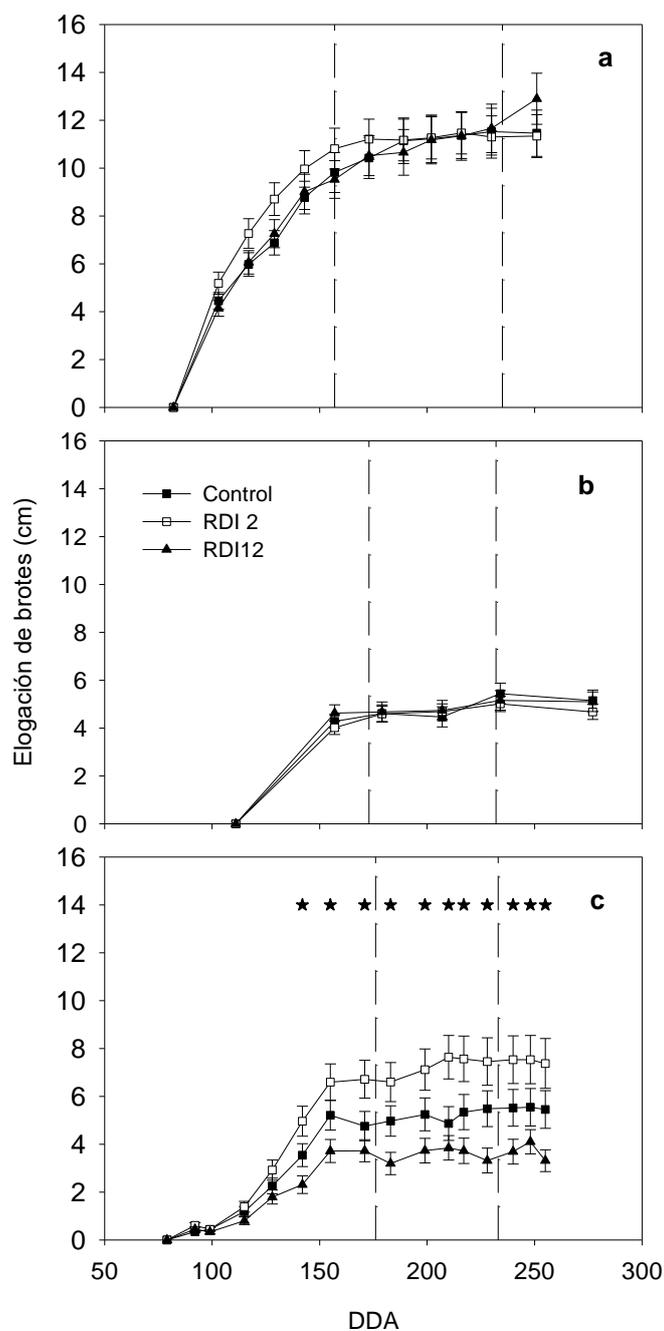
	Carga	Señal MCD			
			Control	RCD-2	RCD-12
2011	30%	Fase II	1.39±0.08	1.40±0.07	1.21±0.05
		Fase III	1.31±0.13	1.33±0.08	1.12±0.11
2012	83%	Fase II	1.08±0.14	1.19±0.07	1.20±0.16
		Fase III	1.00±0.14	1.28±0.07	1.33±0.13
2013	113%	Fase II	0.92±0.08	1.10±0.06	1.06±0.07
		Fase III	0.86±0.09b	1.14±0.08a	1.15±0.08a

El efecto del estrés hídrico tampoco estuvo bien establecido por la señal MCD. Este parámetro fue el empleado para la programación del riego durante la fase II (excepto en el año 2013 en el tratamiento RDC-2). Prácticamente en ninguna fecha de los tres años de experimento se obtuvo una señal MCD que indicase riego en ninguno de los RDCs por lo que la evolución de estos dos tratamientos fue muy similar durante el endurecimiento del hueso. En los años 2011 y 2012 las diferencias entre tratamientos fueron escasas (Figura 25 a y b) y ni si quiera hubo tendencias claras que indiquen condiciones de estrés hídrico (Tabla 10). Tan sólo en algunos periodos del año 2011, especialmente al final de la fase II, hubo tendencia a valores menores en el tratamiento RDC-12 respecto al resto. Esta disminución, sin embargo, no daría por si sola un indicador preciso de estrés. En el año 2012 hubo un periodo de tiempo, al inicio de la fase II (DOY 188-195), en el que los valores de la señal MCD fueron superiores en los tratamientos RDC. Y al final de esta fase (DOY 220-224), los valores de RDI-12 tendieron a ser menores que los del Control. Los valores medios de la señal MCD (Tabla 10) del año 2012 mostraron una tendencia a valores superiores en los tratamientos RDC respecto al Control durante la fase II, que se mantuvo alrededor de 1. Esta tendencia fue especialmente marcada en el momento de la rehidratación (Tabla 10), con diferencias claras y significativas hasta el final del experimento (Figura 24b).

El estrés hídrico tuvo un efecto más claro durante el año 2013 (Figura 25 c). En este año el tratamiento Control estuvo claramente por debajo de los dos tratamientos deficitarios, con valores medios cercanos a 1, aunque las diferencias sólo fueron significativas al final del experimento (Figura 25c; Tabla 10). Los tratamientos deficitarios subieron, en ambos casos, hasta valores cercanos a 1.2 lo que podría indicar valores moderados de estrés hídrico. Estas condiciones se mantuvieron hasta el último tercio de la fase II cuando a partir del día del año (DDA) 220 el tratamiento RDC-12 comienza a disminuir acercándose a los valores observados en el Control. Esta tendencia se vio interrumpida por el periodo de rehidratación en el que de nuevo los dos tratamientos deficitarios estuvieron significativamente por encima del Control, incluso con valores medios significativamente mayores (Figura 25c y Tabla 10) .

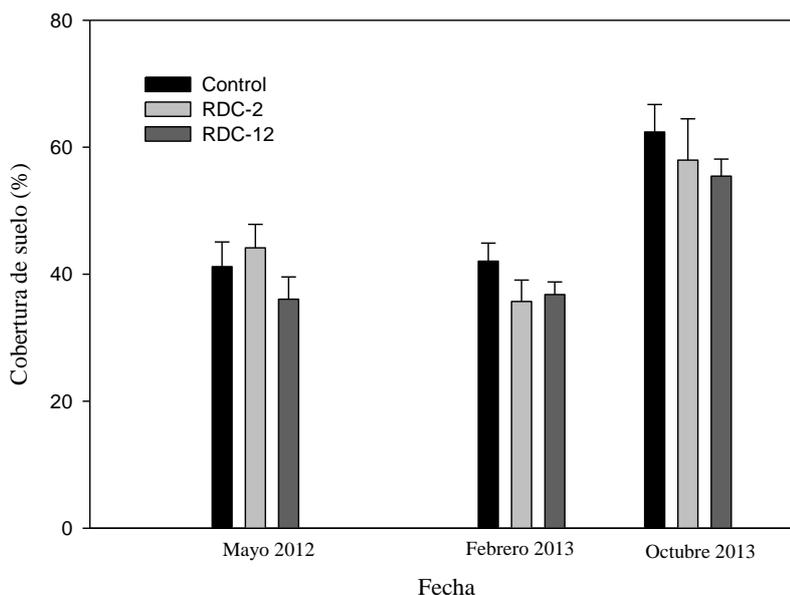
#### *Efecto sobre el crecimiento vegetativo*

El crecimiento vegetativo de los árboles fue diferente según el nivel de carga de cada estación. Durante el año 2011 (año de descarga) el crecimiento de brotes fue mucho mayor, alrededor del doble, que en los años 2012 y 2013 (Figura 26). En los dos años de carga los valores obtenidos fueron de un orden de magnitud similar ligeramente superiores en el año 2013 (Figura 26). En todos los años, los árboles del tratamiento Control presentaron una parada desde la fase de endurecimiento de hueso hasta el final de experimento. Esto dificultó la influencia del estrés hídrico en este parámetro, ya que si el nivel de déficit hídrico no era suficiente durante la fase I, donde tiene lugar la mayor parte del crecimiento, no es posible detectar diferencias. Durante los años 2011 y 2012 no se encontraron diferencias significativas en la elongación de los brotes en ninguna de las fechas de muestreo (Figura 26a y b). En ambas estaciones, la pendiente de subida y el momento en el que se detienen es prácticamente el mismo en todos los tratamientos. Durante el año 2013 se establecieron diferencias durante la fase I (desde el DDA 142) en el que el tratamiento RDC-2 fue mayor que el tratamiento RDC-12, quedando el tratamiento Control con valores intermedios (Figura 26c). Estas diferencias se mantuvieron hasta el comienzo de la fase II donde todos los tratamientos dejaron de crecer aproximadamente en el mismo momento. En ninguna fecha del año 2013 el tratamiento Control fue significativamente mayor que el tratamiento RDI-12.



**Figura 26.** Elongación de los brotes durante los tres años de experimento (a) 2011; (b) 2012; (c) 2013. Cada dato es la media de 60 medidas y las barras verticales indican el error estándar. Las líneas verticales delimitan la fase de endurecimiento del hueso (fase II). Los asteriscos indican diferencias significativas en la fecha marcada ( $p < 0.05$ , Test de Tukey).

La cobertura de suelo es una estimación indirecta del crecimiento vegetativo pero fue estimada solamente en los dos últimos años de experimento (Figura 27).

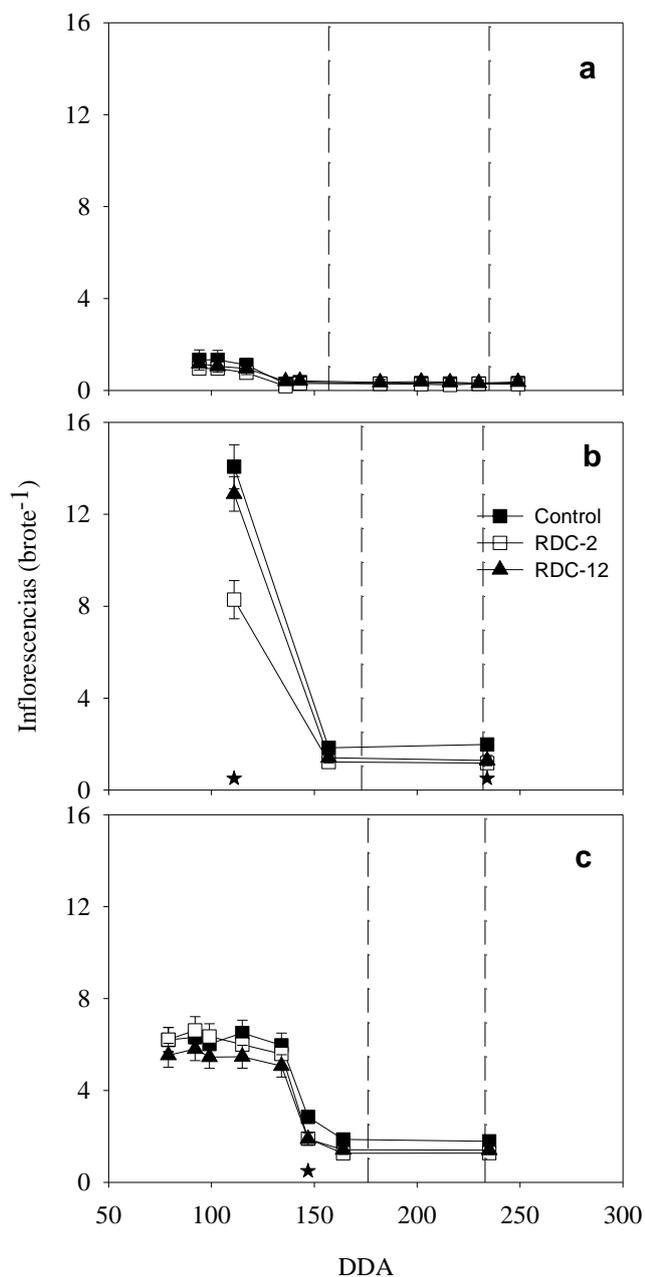


**Figura 27.** Cobertura de suelo en los años 2012 y 2013. Cada barra es la media de 6 árboles y las líneas verticales indican el error estándar. No hubo diferencias significativas entre tratamientos.

El crecimiento del año 2012 fue estimado parcialmente por este parámetro ya que la medida de cobertura se realizó a mediados de la estación de crecimiento. Durante el invierno del año 2012/13 se realizó una poda muy ligera por lo que la diferencia en cobertura entre Mayo 2012 y Febrero de 2013 debería indicar parte del crecimiento estacional del año 2012. El crecimiento prácticamente nulo que, a tenor de este parámetro, tuvieron todos los árboles durante 2012 podría estar relacionado por un ataque muy importante de repilo (*Spilocaeaoleagina*(Cast.) Hughes) durante la primavera que defolío parcialmente los árboles y estaría en consonancia con los datos obtenidos en la elongación de los brotes (Figura 8b). El año 2013, por el contrario, sí se realizó una estimación de crecimiento más adecuada por las fechas de muestreo y el estado sanitario de los árboles. En este año hubo un incremento importante de la cobertura de suelo en todos los tratamientos pasando del 40 al 60% (Figura 27). Sin embargo, no hubo diferencias significativas en ninguna de las dos fechas de muestreo entre tratamientos. En las tres fechas muestreadas los valores de los árboles Control tendieron a ser los mayores aunque las diferencias entre tratamientos no fueron, en ningún caso, muy elevadas. El incremento en cobertura de suelo en el año 2013 fue del 20% en el Control (del 42 al 62%), del 22% en el RDC-2 (del 36 al 58%) y del 19% en el RDI-12 (del 37 al 55%) (Fig. 9).

Efecto sobre número de flores y crecimiento de frutos

La cosecha final está determinada por el número de frutos por brote y el tamaño de estos. El número de inflorescencias/infrutescencias por brote marcado se presenta en la Figura 28.



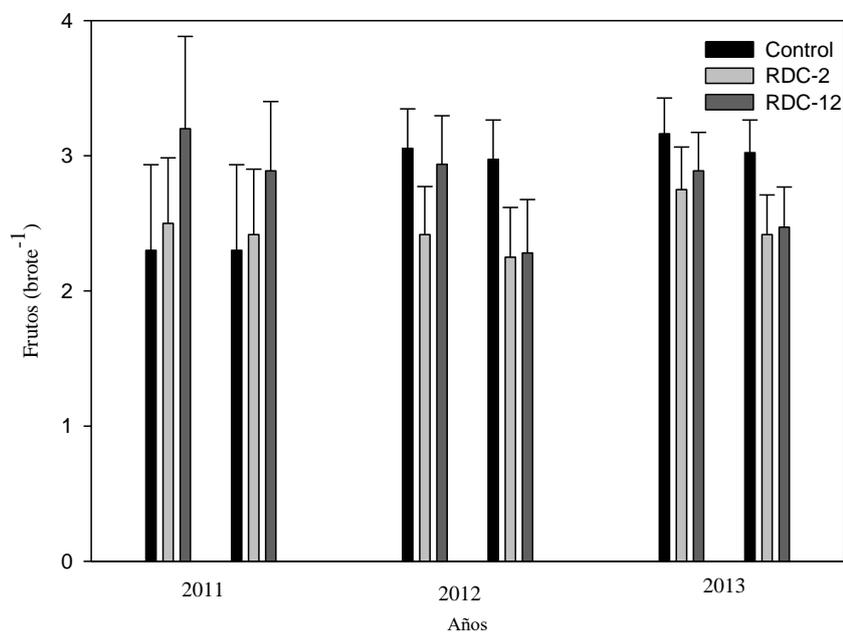
**Figura 28.** Número de inflorescencias por brote marcado durante los 3 años de experimentos (a) 2011; (b) 2012; (c) 2013. Cada símbolo es la media de 60 datos. Las barras verticales indican el error estándar. Las líneas verticales muestran la fase de endurecimiento del hueso (fase II). Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ , Test de Tukey).

Las mayores diferencias aparecen entre años debido al nivel de carga. Mientras que en el año 2011, año de descarga, el número de inflorescencias estuvo cercano a 0 al final de la fase II en todos los casos, los valores obtenidos en los años 2012 y 2013 estuvieron por encima de 1 infrutescencia por brote (Figura 28). La evolución del número de inflorescencias en los tres años fue también el característico de la especie. Tanto en el año 2011 como en el 2013 el número final de inflorescencias por brote, en todos los tratamientos, fue aproximadamente un tercio del estimado al comienzo de la estación (de 1.3 a 0.3 en 2011 y de 6.2 a 1.8 en 2013). Lo que sugiere que no hay una regulación de este proceso incluso en condiciones de muy baja carga como en el año 2011. En el año 2012 la caída fue mucho mayor en todos los tratamientos pero especialmente en Control y RDI-12 (de aproximadamente 13.5 hasta 1.5), que fueron los que tuvieron menos cosecha el año anterior. Esta mayor caída, que ocurrió en todos los tratamientos, pudo estar relacionada con la defoliación provocada por el repilo que tuvo lugar en primavera.

El efecto del riego sobre el número de inflorescencias hay que considerarlo en dos escalas la anual y la interanual. Las diferencias entre tratamientos considerando la misma estación fueron escasas. Solamente en el año 2012, el tratamiento Control tuvo significativamente mayor número de inflorescencias que los tratamientos RDC-2 y RDC-12 al final de la fase II (2 frente 1.3 respectivamente). Aunque no hubo diferencias significativas entre tratamientos deficitarios, la disminución de inflorescencias fue mayor en el tratamiento RDC-12 (de 13 a 1.3) que en el tratamiento RDC-2 (de 8 a 1.3). Las diferencias entre tratamientos, considerando diferentes años, nos indicarían el efecto del estrés hídrico del año anterior. Las diferencias al comienzo del año 2012 entre RDC 2 y el resto de tratamientos no parece que estuviesen relacionadas con el estrés hídrico puesto que el número de inflorescencias de RDC-12 son similares al Control, si no que tuvieron que ver con la cosecha del año anterior. Por el contrario, los valores iniciales del año 2013 no fueron significativamente diferentes entre tratamientos aunque los obtenidos en el tratamiento RDC-12 (5.6) tendieron a ser ligeramente inferiores a los de Control y RDI-2 (6.2) lo que podría sugerir un cierto efecto del estrés hídrico del año anterior.

El efecto de la carga de la cosecha puede enmascarar la respuesta al estrés hídrico, por esta razón para evaluar el efecto del riego deficitario en la caída de frutos se seleccionaron en cada año solo los brotes con fruta al comienzo de la fase II (Figura 29) y de esta manera poder comprobar el efecto de los tratamientos en este periodo. Esta selección permitió que los

valores medios obtenidos en el tratamiento Control oscilasen menos entre años que cuando se consideraron todos los brotes en el número de inflorescencias (Figura 28 vs 29).



**Figura 29.** Evolución del número de frutos al inicio (derecha) y al final (izquierda) de la fase II durante los 3 años de experimentos. En cada año se consideraron solamente aquellos brotes marcados que tenían fruto al comienzo de la fase II. Las barras verticales indican el error estándar. No hubo diferencias significativas entre tratamientos.

En ningún año hubo diferencias significativas entre tratamientos en el número de frutos en las dos fechas de muestreo (Figura 29). Sin embargo hay tendencias muy claras en los 3 años, y especialmente en el tratamiento RDC-12, a disminuir el número de frutos por brote en los tratamientos deficitarios frente a valores casi constantes en el tratamiento Control (Figura 28). El porcentaje de reducción en el número de frutos por brote, por el contrario, sí fue significativa en el año 2012 con una reducción del 27% en el RDI-12 frente a 2% en Control y 9% en RDI-2 que no fueron significativamente diferentes entre ellos (Tabla 11). El resto de los años no se obtuvieron diferencias significativas aunque los tratamientos deficitarios tendieron a valores superiores al Control (Tabla 11).

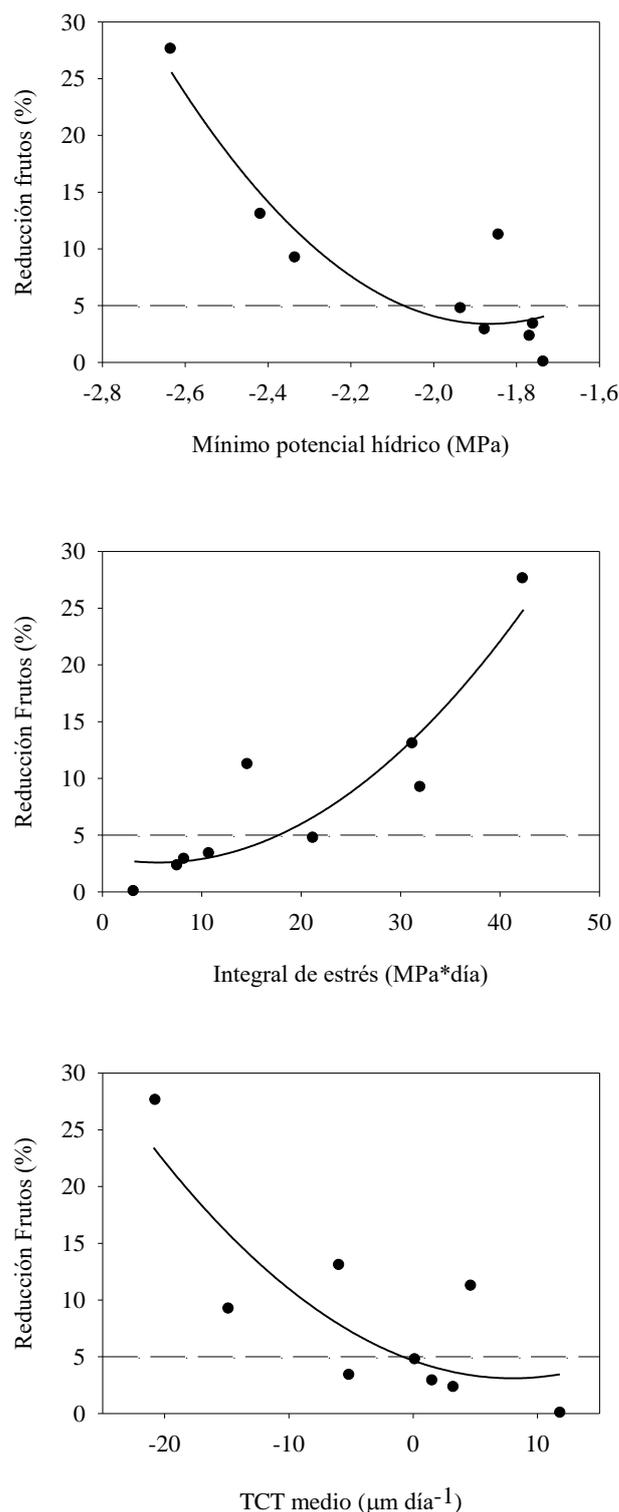
**Tabla 11.** Reducción en el número de frutos durante la fase II en los tres años de experimentos. La columna “carga” indica el porcentaje de cosecha de los árboles Control respecto de la media de la parcela en los años 2008 a 2013. Letras diferentes en la misma línea indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ , Test Tukey).

	Carga	Reducción frutos (%)			
		Fase II	Control	RDC-2	RDC-12
2011	30%	Fase II	0.0±0	2.8±3.4	4.8±4.8
2012	83%	Fase II	2.3±1.3 a	9.2±5.8 a	27.6±6.6 b
2013	113%	Fase II	2.8±1.1	11.2±4.6	13.0±4.7

Los datos de reducción en el número de frutos por brote (Tabla 11) se relacionaron con el mínimo potencial hídrico (Figura 30 a), la integral de estrés hídrico (Figura 30b) y la tasa de crecimiento media (Figura 30c) todos ellos durante la fase II. En todos los casos hubo relaciones significativas, especialmente robustas en el caso de los dos primeros parámetros (Figura 30a y Figura 30b). Las relaciones de este parámetro y la integral de estrés o el potencial hídrico mínimo fueron muy similares en el coeficiente de determinación y el error estándar.

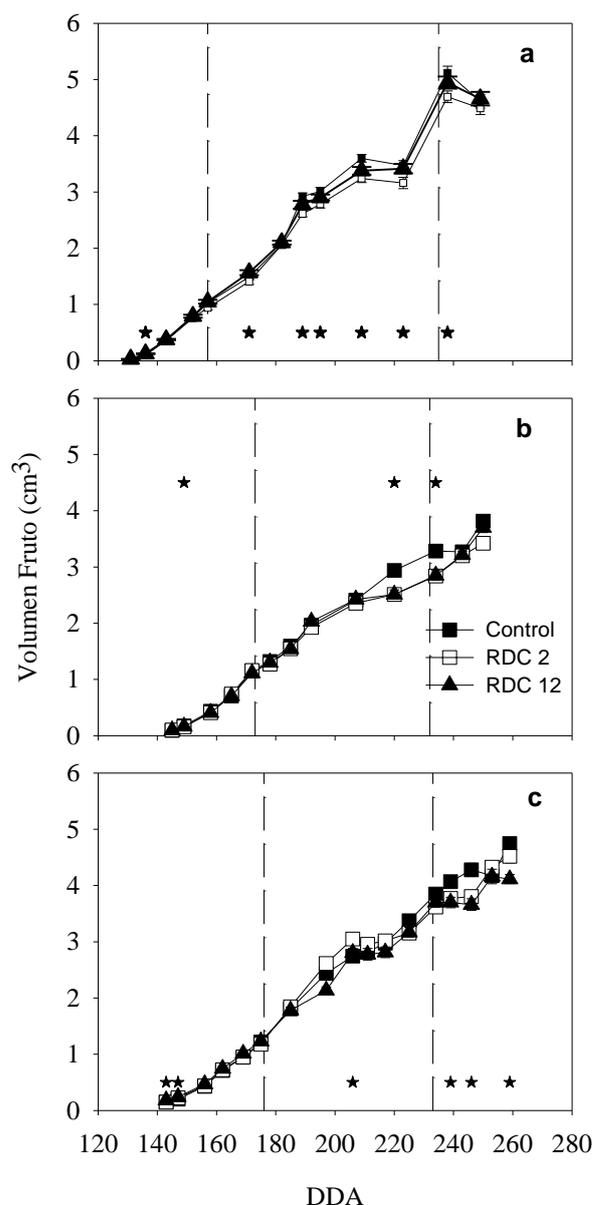
En todos los casos un incremento de estrés hídrico dio lugar a una mayor caída de frutos en el brote. El ajuste cuadrático sugiere que la pendiente de incremento de esta caída es menor al inicio que a partir de un cierto umbral. En ningún caso una relación multivariante mejoró las relaciones de estas figuras. Los datos de los tratamientos deficitarios del año 2013, especialmente el del tratamiento RDC-2, tienden a estar por encima de lo esperado. A nivel regional en el año 2013 se detectó una mayor caída de aceitunas por un gran incremento de *Prays oleae* Bernard (Red de alertas de Información sanitaria de Andalucía), lo que podría sugerir que estos valores no son exclusivamente debidos a condiciones de estrés hídrico por lo que las curvas de ajuste podrían estar ligeramente por debajo de las estimadas.

El crecimiento del fruto es el tercer parámetro en el que el estrés hídrico podría influir de forma significativa en la cantidad y valor de la cosecha final. El fruto creció de manera continua en el tratamiento Control durante los tres años de experimento hasta el momento de la cosecha (Figura 31).



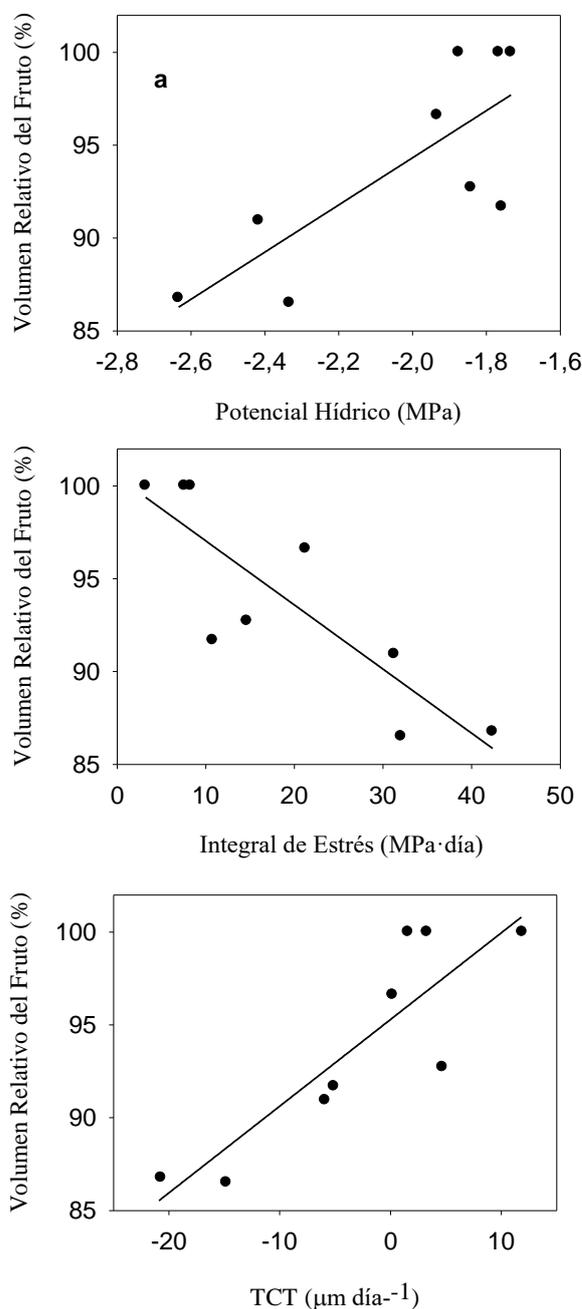
**Figura 30.** Relación entre los datos de porcentaje de caída de frutos (Tabla 4) y el potencial hídrico mínimo (Fig. 3), la integral de estrés hídrico durante la fase II (Fig. 5) y la tasa de crecimiento del tronco media durante la fase II (Tabla 1). Se incluye la mejor ecuación de regresión para cada figura (% reduc. Frutos= $134.4+140.4\cdot\Psi+37.6\cdot\Psi^2$ ,  $R^2=0.84^{**}$ , Error Estándar=3.96, n=9; %reduc Frutos= $3.1-0.19IS+0.02IS^2$ ,  $R^2=0.84^{**}$ , Error Estándar=3.99, n=9; % reduc Frutos= $4.74-0.41TCT+0.02TCT^2$ ,  $R^2=0.68^*$ , Error estándar=5.5, n=9). La línea horizontal representa un nivel aceptable de caída de frutos.

El crecimiento en este tratamiento fue a una tasa prácticamente lineal durante toda la estación. Los tamaños finales obtenidos en el tratamiento Control no estuvieron influenciados por el nivel de carga, así los frutos del año 2011 (año de descarga, 30% de la cosecha media) fueron de un tamaño similar a los del 2013 (año de carga, 113% de la cosecha media). En todos los años hubo diferencias significativas entre el Control y los tratamientos deficitarios en algún momento de la estación de riegos, pero en ningún caso fueron superiores al 15% y en todos los años, a excepción del tratamiento RDC-12 en el año 2013, la recuperación fue total al final de la estación de riegos.



**Figura 31.** Evolución estacional en el crecimiento del fruto durante los tres años de experimento (a) 2011; (b) 2012; (c) 2013. Cada dato es el promedio de 60 medidas. Las barras verticales representan el error estándar y si no aparecen es debido a que el símbolo es mayor. Las líneas verticales indican la fase de endurecimiento del hueso (fase II). Los asteriscos muestran las fechas en la que hay diferencias significativas ( $p < 0.05$ ; Test de Tukey).

Si los datos de tamaño de fruto al final de la fase II, en cada año, se relativizan respecto al Control se obtiene una relación lineal entre estos y los indicadores de estrés (Figura32). En ningún caso una relación multivariante mejoró los resultados de las regresiones lineales de la Figura32.



**Figura 32.** Relación entre el tamaño relativo de fruto al final de la fase II y los indicadores de estrés hídrico empleados. El 100% es el tamaño obtenido en el tratamiento Control. (a) Potencial hídrico mínimo en la fase II. Tamaño relativo= $119.7+12.7 \Psi$ ;  $R^2=0.61^*$ ; Error Estándar=3.6; n=9 (b) Integral de estrés hídrico. Tamaño relativo= $100.5-0.35IS$ ;  $R^2=0.72^{**}$ ; Error estándar=3.1; n=9 (c) TCT media. Tamaño relativo= $95.2+0.47 TCT$ ;  $R^2=0.75^{**}$ ; Error Estándar=2.9; n=9.

Aunque los tres indicadores empleados tuvieron una relación significativa, fueron la integral de estrés y la TCT media los que mejor ajuste presentaron. Hasta el 75% de la variabilidad del volumen del fruto al final de la fase II estuvo caracterizada por los valores medios de TCT. En todos los casos un incremento del estrés hídrico, es decir menores valores de potencial hídrico o TCT y mayores de integral de estrés, dieron lugar a una disminución del volumen de fruto (Figura 32).

*Efecto en la cosecha y parámetros de calidad*

Los parámetros de calidad y la cosecha final obtenida se presentan en la Tabla 12. La cosecha en los árboles Control fue incrementándose paulatinamente cada año. En el 2011 la cosecha fue aproximadamente el 30% de la media de los datos bienales desde el año 2008, lo que lo califica como un año de descarga. El año 2012 estuvo cercano a la media pero no presentó la característica vecería que cabría esperar por el nivel de cosecha del año anterior. Esta ausencia de vecería estuvo relacionada seguramente con el ataque de repilo ya mencionado más arriba lo que regularizo la cosecha en el año 2013.

**Tabla 12.** Calidad y cantidad de la cosecha durante los tres años de experimentos (media±error estándar). Los datos de cosecha (TM ha<sup>-1</sup>) es la media de 15 medidas en el tratamiento Control y 9 en los RDCs. Los datos de calidad es la media de 6 muestras. La relación pulpa/hueso es el cociente entre el peso fresco (F) o seco (S) de la pulpa y el hueso. Letras diferentes indican diferencias significativas dentro del mismo año y parámetro (p<0.05, Test de Tukey).

		Control	RDC-2	RDC-12
2011	Cosecha	2,5±0,5	4,1±0,6	2,9±0,6
	Fruto Kg <sup>-1</sup>	188±5b	206±5a	190±4ab
	Pulpa/Hueso F	6,2±0,1a	5,7±0,1b	6,1±0,1 a
	Pulpa/Hueso S	2,8±0,1	2,5±0,1	2,8±0,1
	IndiceMadurez	2,9±0,2 a	1,6±0,1 b	2,3±0,2 a
2012	Cosecha	6,6±0,7	5,0±0,8	5,9±0,7
	CosechaBienal	4,6±0,5	4,5±0,6	4,4±0,4
	Fruto Kg <sup>-1</sup>	233±13	249±10	240±10
	Pulpa/Hueso F	4,1±0,1	4,1±0,2	4,4±0,2
	Pulpa/HuesoS	1,9±0,1	2,2±0,1	2,3±0,1
IndiceMadurez	0,8±0,2	0,8±0,1	0,9±0,1	
2013	Cosecha	9,0±1,1	8,2±0,6	6,7±0,7
	CosechaBienal	7,8±0,6	6,6±0,6	6,3±0,7
	Fruto Kg <sup>-1</sup>	229±13	209±7	208±11
	Pulpa/Hueso F	4,6±0,3	5,2±0,2	5,0±0,3
	Pulpa/Hueso S	2,1±0,1b	2,5±0,1a	2,3±0,1ab
IndiceMadurez	1,0±0,1	1,3±0,2	1,1±0,1	

El efecto del estrés hídrico sobre la cosecha no fue significativo en ninguno de los años de estudio (Tabla 12). A tenor de los resultados, las campañas de los años 2011 y 2012 reflejan el final de un ciclo vecero en el que las parcelas de los tratamientos Control y RDC-12 están en las mismas condiciones, mientras que RDC-2 presenta una mayor atenuación de este ciclo. Esto supone que en el año 2011 el RDC-2 tuvo una clara tendencia a mayores cosechas (aproximadamente un 64%) que Control y RDC-12 que fueron muy similares. El efecto contrario aparece en el año 2012, en el que el RDC-2 resultó ser el de menor cosecha, aunque las diferencias entre el Control y el RDC-12 fueron mayores que en el año precedente (en 2011 RDC-12 fue un 16% mayor que Control, mientras que en 2012 fue un 11% inferior). La campaña del año 2013 presentó diferencias más claras con los tratamientos Control y RDC-2 en valores muy cercanos (con una diferencia algo menor del 9%) y una gran caída del RDC-12, que fue aproximadamente un 25% menor que los árboles Control.

La calidad del fruto es de mayor importancia en aceituna de mesa que de aceite, parámetros como el tamaño de fruto y una relación pulpa hueso alta son apreciados por la industria del aderezo. El tamaño de fruto, expresado en número de frutos en un Kg, no estuvo claramente afectado por el nivel de carga de los árboles. Un incremento de más del triple en cosecha entre el año 2011 y el 2013 en el tratamiento Control sólo supuso una disminución del 18% en el número de frutos por Kg (Tabla 12), lo que está de acuerdo con el volumen de fruto medido en campo (Figura 31). No hubo diferencias claras en el tamaño de fruto derivadas de los tratamientos de riego. Las diferencias significativas entre RDC-2 y el resto, durante el año 2011, estuvieron posiblemente más relacionadas con las diferencias en cosecha que con los tratamientos de riego ya que los niveles de estrés hídrico fueron similares entre RDC-12 y RDC-2.

La relación pulpa hueso, por el contrario, sí estuvo más influenciada por el nivel de cosecha de los árboles. La variación en carga en los árboles Control entre los años 2011 y 2013, supuso una disminución mayor del 25% en la relación pulpa hueso en fresco y seco (Tabla 12). Los tratamientos deficitarios tendieron a mayores valores de la relación pulpa hueso en los años 2012 y 2013, con tendencias más claras en los valores en seco que fueron significativamente mayores en el último año. Destaca el tratamiento RDC-2 durante el año 2013 en el que a pesar de tener un alto nivel de cosecha obtuvo una relación pulpa hueso en seco igual a un nivel de cosecha de aproximadamente la mitad y similar en fresco a los obtenidos en el año 2011.

La coloración del fruto no es un parámetro que habitualmente se registre entre los índices de calidad de la aceituna de mesa. No obstante la aparición de zonas violáceas deprecia el producto. Aunque el índice seguido en la Tabla 12 es el típico de aceituna de aceite (ver Materiales y Métodos) es útil para describir las variaciones en color. El tipo de aderezo de la Manzanilla (en verde) supone que el índice de madurez debe estar en torno a 1 y que valores mayores de 2 supone la presencia de zonas violáceas en el fruto. Solamente en el año 2011 y en los tratamientos Control y RDC-12 se obtuvieron valores mayores de 2 y significativamente diferentes de RDC-2. Este efecto estuvo asociado, posiblemente, con la menor cosecha obtenida en estos dos tratamientos que acortó el ciclo de cultivo. En las otras dos campañas, 2012 y 2013, no hay diferencias significativas entre los tratamientos y en ningún caso los valores son superiores a 1.5. No hay tendencias claras que sugieran influencia del estrés hídrico en los valores obtenidos en este parámetro.

### **6.1.2 DISCUSIÓN**

*Los indicadores de la fluctuación del diámetro del tronco como herramientas en la programación del riego deficitario.*

La señal MCD no resultó ser un indicador sencillo de interpretar a pesar de las mejoras introducidas respecto a trabajos anteriores (Moriani et al., 2013). El uso de una línea base, según proponen Corell et al. (2013), consiguió valores de la señal MCD del Control cercanas a 1 en los años de carga. En los tratamientos deficitarios la señal MCD fue superior a 1. Aunque en el tratamiento más estresado (RDC-12) se obtuvieron valores  $< 1$ , en periodos aislados al final de la fase II. Estas diferencias ya se analizan en el capítulo 2 y podrían ser de utilidad para la programación del riego aunque su uso aislado es complejo.

Los datos del presente trabajo sugieren que la TCT puede ser un indicador de interés. Sin embargo, para tener un manejo más sencillo y preciso es necesario emplear simultáneamente la TCT diaria, el valor medio de TCT en un determinado periodo y la representación de la TCT diaria acumulada (lo que hemos denominado Figura de diámetros máximos). Incluso empleando estos tres parámetros las lluvias han sido una gran interferencia. Durante la fase I el uso de la TCT ha sido muy limitado, la pluviometría elevada dio lugar a rehidrataciones bruscas y caídas posteriores que duran varias semanas y que no están relacionadas con periodos de estrés hídrico (Figura24). Este tipo de respuesta ha sido

descrita en otros trabajos (Moriani et al., 2013). En condiciones en las que la lluvia sea de poca entidad o el periodo de precipitaciones sea corto el parámetro es válido como en el caso de las fases II y rehidratación.

En ausencia de lluvias es preciso considerar la respuesta de la TCT a los eventos de riego y a los cambios de temperatura. En condiciones de estrés hídrico significativo un evento aislado de riego, tal y como se plantean con el protocolo de programación empleado, da lugar a incrementos bruscos de la TCT (Figura 24, periodo de rehidratación). Esto supone que la TCT media del periodo o la que se puede observar en la curva de diámetros máximos se aleje del umbral seleccionado. Un ejemplo son los periodos de rehidratación del presente trabajo. Durante estos periodos el umbral de riego era  $-5 \mu\text{m día}^{-1}$  (ver Materiales y Métodos). La TCT indicó el momento en el que los árboles entraban al nivel de estrés deseado pero el riego supuso una gran subida del indicador diario (Figura 24) lo que da lugar a que la TCT media en el periodo sea mucho mayor que el umbral al que se está regando (Tabla 1). En estas condiciones, este tipo de respuesta no es un inconveniente ya que la TCT diaria muestra de forma clara a que nivel de estrés está la planta. Sí puede ser un hándicap a la hora de evaluar el nivel de estrés con la TCT media ya que, especialmente en la rehidratación, los valores medios están muy alejados del umbral marcado. No obstante este trabajo demuestra que el manejo en estas condiciones es plenamente satisfactorio ya que se obtuvo una rehidratación eficiente sin necesidad de regar todos los días. Al final de todos los experimentos hubo una tendencia a valores menores de conductancia foliar en los tratamientos deficitarios (Figura 22) pero otros parámetros como el potencial hídrico (Figura 21) y el volumen de fruto (Figura 31) indican que la recuperación fue suficiente. Pérez-López et al. (2008a) en un ensayo en olivar sugiere que la recuperación completa de todos los indicadores de relaciones hídricas es función del volumen de suelo humedecido. Teniendo en cuenta que la programación empleada en el presente trabajo mantiene condiciones de déficit hídrico es de esperar que fisiológicamente no se obtenga una recuperación completa. No obstante, los resultados indican que sí fue suficiente de cara a la calidad de los frutos obtenidos. La caracterización del tratamiento podría completarse incluyendo en el protocolo de programación no sólo la TCT diaria a la que se realizará el riego, sino también la TCT media esperada o la evolución de la curva de diámetros máximos.

Los resultados del Capítulo 2 indican que hay una respuesta de la TCT a las variaciones en las condiciones ambientales, independientes del efecto del estrés hídrico. Este tipo de respuesta dio lugar a patrones de comportamiento que no fueron los esperados cuando

se programó el riego en función de la TCT durante la fase II (Figura 24c, tratamiento RDC-2). En este caso (año 2013), el objetivo era obtener una TCT media alrededor de  $-10 \mu\text{m día}^{-1}$ , empleando como umbral de riego ese valor en la TCT diaria (ver Materiales y Métodos). Aunque la cantidad de agua aportada en el tratamiento RDC-2 fue sensiblemente inferior a la del Control (Fig. 1c), la evolución de los diámetros máximos (Figura 24c) y la TCT media (Tabla 8) fueron muy distintas de los planteados. Este tipo de respuesta podría estar relacionada con “falsos positivos” en los que los valores de TCT diaria inferiores a  $-10 \mu\text{m día}^{-1}$  estuvieron provocados por efecto ambiental. Incluso en estas condiciones los valores de TCT media en fase II parecen ser un indicador muy fiable a tenor de las relaciones obtenidas con el porcentaje de caída de frutos (Figura 30) y el tamaño de estos (Figura 32). Por lo tanto, el indicador es válido, el problema radica en controlar su evolución y conseguir el nivel de estrés hídrico deseado. Esto supone que en estas condiciones deberían de emplearse los valores diarios de TCT corregidos según se sugiere en el Capítulo 2 junto a los valores de TCT media. Una posible metodología consistiría en tener los valores de TCT diarios como “alertas” aunque no se realizaría el riego hasta no tener valores medios de la TCT cercanos al umbral marcado. Es preciso realizar ensayos que permitan corroborar que este tipo de programación del riego es posible llevarla a cabo y que limitaciones puede tener.

Todo esto sugiere que se distinguen dos manejos diferenciados de la TCT diaria, teniendo en ambos casos el objetivo de obtener una TCT media umbral. En condiciones de rehidratación o crecimiento activo la toma de decisiones empleando solamente la TCT diaria es adecuada ya que puede indicar el comienzo del periodo de estrés o, al menos, en caso de ser un “falso positivo” supone condiciones de sobrerriego en un periodo de recuperación en el que se pretende un riego óptimo, por lo que su efecto no es perjudicial. Por el contrario, en fases del cultivo donde no hay crecimiento y no estamos en una fase de recuperación estos “falsos positivos” producen un sobrerriego no deseado. En ese caso el manejo, como en el presente trabajo, del valor diario de TCT da lugar a un retraso en la estrategia de riego deficitario. En esta situación, es más recomendable una lectura de los diámetros máximos en la que podamos ir deduciendo una TCT media cercana al objetivo marcado.

#### *Efecto del riego deficitario controlado en la cosecha de aceituna de mesa*

El efecto del estrés hídrico en olivar puede afectar a diferentes procesos que podríamos considerarlos en una escala anual, es decir que ocurre en la estación en curso, o plurianual, el estrés hídrico en un año afecta a la producción del siguiente. El efecto plurianual

está relacionado con el crecimiento de los brotes que limita el número de puntos fructíferos del año próximo y la inducción floral. Los niveles de estrés hídrico del presente trabajo no tuvieron efecto sobre la inducción floral del año siguiente ya que en ningún caso hubo diferencias claras en el número de inflorescencias al comienzo del año (Figura 27). Considerando una escala anual, del año en curso, el periodo más sensible es la fase I, floración-cuajado (Moriani et al., 2003). En este estado fenológico a pesar de iniciar el recorte en RDC-12 no se detectó ningún efecto sobre la cosecha que estuviese relacionado con una caída de frutos superior al resto de los tratamientos (Figura 28). El efecto anual en cosecha, por lo tanto, tuvo lugar únicamente durante la fase II y estaría relacionado con el número de frutos y el tamaño de éstos. El presente trabajo indica que los niveles de estrés hídrico obtenidos en el cultivo por la programación de riego sugerida dio lugar a disminuciones del volumen del fruto respecto a los árboles Control al final de la fase II (Figura 31 y 32). No obstante la rehidratación permitió una recuperación total del tamaño del fruto. La capacidad de rehidratación del olivar es alta aunque es habitual que el intercambio gaseoso se vea más afectado (Moriani et al., 2002). Los umbrales sugeridos son, por lo tanto, sostenibles con respecto a este parámetro.

Los dos efectos que tuvieron una mayor influencia a tenor de los datos presentados son el crecimiento vegetativo, en cuanto a limitación del volumen de copa, y la caída de frutos. Caruso et al. (2013) indica que en olivar joven las diferencias en cosecha por efecto del riego estuvieron relacionadas solamente con disminuciones en el tamaño de los árboles. Sin embargo, en olivar adulto son difíciles de cuantificar en la cosecha final debido a los ciclos veceros y la poda. El año 2011 no parece que tuviese ningún efecto debido al bajo nivel de carga (Tabla 12) lo que supone que los datos pueden considerarse de referencia de reducciones por caída de frutos (Figura 30, los datos de reducción están como máximo entorno al 5%). En el año 2012 el repilo, posiblemente, minimizó los efectos en el tamaño de los árboles en el tratamiento RDC-12, mientras que el ciclo vecero altera los obtenidos en RDC-1. Esto supone que la reducción en cosecha del tratamiento RDC-12 en el 2012 (en torno al 11%, Tabla 9) estuvo posiblemente debida a un porcentaje de reducción del número de frutos en el brote alrededor del 25% (Figura 30). Esta disparidad puede estar relacionada por el nivel de radiación. En una plantación de este tipo, la zona de muestreo seleccionada (la altura de la persona que realiza el muestreo) tiene un nivel de radiación inferior lo que podría provocar una caída mayor que en otras zonas mejor iluminadas y en las que se concentraría la producción. Diferentes autores han sugerido que la floración y cuajado en olivar está ligada al nivel de radiación lo que limita las explotaciones superintensivas (Pastor et al., 2007;

Cherbiy-Hoffmann et al., 2013). Las diferencias en el 2013 en volumen de copa entre los tratamientos deficitarios fue pequeña al inicio de la estación pero clara con el tratamiento Control (Figura 26). La menor cosecha del RDC-2 frente al Control en este año (entorno a un 10%, Tabla 12) podría estar relacionada con esta diferencia en tamaño del árbol (42% Control vs 36% RDC-2 de cobertura de suelo) ya que los niveles de estrés obtenidos en este tratamiento fueron muy pequeños (Figura 20c, 21c, Tabla 8). Por otro lado, las diferencias en cosecha entre RDC-12 y el Control (Tabla 12) podría cuantificarnos el efecto combinado de la caída de frutos y la disminución en tamaño del árbol (26% de reducción en cosecha en RDC-2 con una cobertura de copa de 37% vs 42% en Control). Es preciso tener en cuenta que a tenor de estos datos la caída de frutos del año 2013 fue superior a la esperada de acuerdo al nivel de estrés conseguido y que posiblemente esté relacionado con un ataque mayor de lo habitual de prays. La Figura 30c (relación TCT media vs reducción en el número de frutos) sugiere también esta sobreestimación.

La calidad de la cosecha sólo se vio alterada por el incremento de la relación pulpa hueso en los tratamientos deficitarios (Tabla 12). De acuerdo con Gomez-del-Campo et al. (2014) este proceso podría estar relacionado con un menor tamaño del endocarpo por efecto de un estrés temprano. Sin embargo, los niveles de estrés hídrico durante la fase I fueron prácticamente nulos. El crecimiento del endocarpo finaliza al final de la fase I y está muy relacionado con la parada de crecimiento del tronco (Pérez-López et al., 2008b) y la disminución del crecimiento longitudinal del fruto (Rapoport et al., 2013) parámetros empleados en el presente trabajo para establecer el comienzo de la fase II. Esto supone que la mayor relación pulpa-hueso podría estar más ligada a un mayor peso de la pulpa. Diversos autores han sugerido que condiciones de estrés hídrico moderado han dado lugar a una mayor acumulación de aceite (Moriani et al. 2003; Lavee et al., 2007). El inicio de esta acumulación podría estar en torno a finales de agosto lo que podría suponer un mayor incremento de peso de la pulpa en los frutos estresados respecto de los bien regados.

La caída de frutos en fase II y la reducción del crecimiento de los árboles son los dos efectos que más redujeron la cosecha final. El crecimiento de los árboles puede estar compensado por la poda. No obstante la TCT podría ser un indicador de interés en condiciones de lluvias primaverales no limitantes. La caída de frutos con el tipo de muestreo realizado magnifica el efecto del estrés sobre la cosecha final. No obstante, es un efecto a tener en cuenta.

*Umbrales de estrés hídrico recomendados*

La ausencia en la mayor parte de los años de un indicador que muestre el efecto del estrés hídrico en fase I hace muy difícil el sugerir un umbral en este periodo fenológico. Sólo los datos del año 2013 indican que hubo un estrés bajo que no repercutió en la caída de frutos pero sí en el crecimiento. Esto podría sugerir que el nivel empleado en la TCT de la fase I ( $20 \mu\text{m día}^{-1}$ ) podría ser el adecuado no obstante este valor debe ser comprobado en experimentos futuros.

La fase II, por el contrario, sí presentó varios indicadores que podrían sugerir el manejo del riego en función de niveles de estrés hídrico. La ausencia de relación entre los indicadores de estrés hídrico y la cosecha final podrían estar relacionados con el hecho de que la cosecha es el resultado final de un cúmulo de factores (tamaños del fruto, número de frutos, vecería) que a su vez están afectados de forma diferente por lo que es difícil obtener una buena relación directa. Teniendo en consideración que a los niveles de estrés hídrico del presente trabajo no hubo una afección final del tamaño de fruto, el fenómeno de la caída parece el más limitante. Los indicadores más sensibles en este proceso fueron el potencial hídrico y la integral de estrés hídrico. En este caso niveles de  $-2,2 \text{ MPa}$  o  $20 \text{ MPa}\cdot\text{día}$  respectivamente suponen un umbral que podría disminuir de forma drástica la cosecha. La TCT fue en este caso un indicador menos fiable, no obstante es probable que valores alrededor de  $-10 \mu\text{m día}^{-1}$  fuesen admisibles en esta fase de cultivo. Las referencias a niveles de estrés basados en planta son escasos en la bibliografía. El valor de referencia en torno a  $-1.4 \text{ MPa}$  como valores óptimos (Mariana et al., 2012) nos indica que el valor sugerido en el presente trabajo podría ser adecuado. Dell'Amico et al. (2012) en olivos en descarga sugiere los  $-1.8 \text{ MPa}$  de potencial hídrico de tronco medido al mediodía como un umbral en el que no se afectó el crecimiento del fruto. Respecto a la TCT media, Mariana et al. (2013) sugiere una TCT media alrededor de  $-5 \mu\text{m día}$  en fase II y recuperación. Por otro lado, hay que indicar que el proceso de crecimiento del fruto parece, a tenor de los datos del presente trabajo, ajustarse más a indicadores estacionales, que consideran la duración y el nivel de estrés hídrico como la integral de estrés hídrico o la TCT media que a niveles puntuales (como sugieren los resultados del Capítulo 1).

La fase de recuperación en el presente experimento fue corta en comparación con la que tiene los olivares dedicados a aceite. Esta menor duración y la gran influencia del tamaño del fruto en la calidad pueden limitar la capacidad de selección de umbrales. El valor

seleccionado,  $-5 \mu\text{m día}^{-1}$  de TCT sugerido en Moriana et al. (2013), dio lugar a recuperaciones lentas de las relaciones hídricas con diferencias significativas en el intercambio gaseoso al final de alguno de los años. No obstante el tamaño de fruto, aunque lentamente en alguna de las estaciones, terminó por recuperarse de manera total. Estos resultados sugieren que el nivel seleccionado es viable en el periodo de tiempo en el que nos movemos.

## **6.2 CONCLUSIONES**

La TCT es un indicador fiable para la programación de riego en ausencia de lluvias. El uso de la TCT diaria puede ser limitante para aplicar determinados niveles de estrés hídrico especialmente durante la fase II. En este caso es conveniente el uso combinado de la TCT diaria y la gráfica de diámetros máximos que nos permita alcanzar una TCT media objetivo de nivel de estrés.

La evolución de las cosechas obtenidas en todos los tratamientos sugiere que a los niveles de estrés hídrico que se implantaron en los tratamientos hubo tres efectos. Dos de ellos tuvieron lugar durante la estación de riego: afección del crecimiento del fruto y caída de frutos, el tercero fue el crecimiento que tuvo un efecto plurianual. A los niveles de estrés hídrico empleados la afección del tamaño del fruto fue reversible en todos los casos con una rehidratación parcial. La caída de frutos fue baja en la mayor parte de los tratamientos aunque influyó en la cosecha obtenida. El efecto del crecimiento de los árboles sólo es patente durante el último año ya que la poda tradicional de la zona tiende a igualar los árboles al final de cada estación.

Las condiciones climatológicas no permitieron ningún resultado claro obtenido durante la fase I. En la fase II, endurecimiento de hueso, el potencial hídrico y la integral de estrés tuvieron un ajuste muy bueno con la caída de frutos. La TCT media aunque tuvo también un ajuste significativo este fue peor. Niveles de  $-2,2 \text{ MPa}$  de potencial hídrico,  $20 \text{ MPa}\cdot\text{día}$  de integral de estrés y  $-10 \mu\text{m día}^{-1}$  de TCT media en este periodo podrían ser adecuados para minimizar la caída de fruto.

El tamaño de fruto tuvo una relación lineal con estos tres parámetros lo que sugiere una mayor sensibilidad. El mejor ajuste con parámetros integradores como la TCT media y la integral de estrés frente al potencial hídrico sugieren un proceso acumulativo. No obstante los niveles de estrés a los que fueron sometidos los árboles fueron contrarrestados totalmente en

el periodo de rehidratación. El umbral de TCT de  $-5 \mu\text{m día}^{-1}$  empleado en rehidratación fue adecuado.

## 7 CONCLUSIONES.

Condiciones de estrés hídrico moderado durante el período del endurecimiento del hueso produjeron una respuesta fisiológica progresiva en olivo relacionada con el nivel de estrés impuesto. Se detectaron dos fases diferentes durante el ciclo de estrés realizado. En un primer periodo, la deshidratación foliar y el consiguiente cierre estomático no tuvieron efecto en el crecimiento del fruto posiblemente por un conjunto de factores que lo compensaron como la deshidratación del tronco y ajuste osmótico en el fruto (aunque este no fue medido). En un segundo periodo, el fruto se vuelve un sumidero más activo de agua, sugerido por el cambio de tendencia en la diferencias entre ambos potenciales hídricos. Sin embargo estos cambios no evitaron la disminución del crecimiento del fruto. Durante la rehidratación el fruto sigue siendo un sumidero de agua preferente lo que permite una rápida recuperación del crecimiento del fruto.

La MCD es un parámetro que presentó dificultades en su manejo como indicador de estrés hídrico debido a una zona de incertidumbre que podría ir desde aproximadamente los -2 MPa hasta -3 MPa. El uso de la señal MCD mejoró ligeramente la capacidad de detección del estrés hídrico ya que valores superiores a 1,1 estuvieron relacionados siempre con condiciones de estrés hídrico. No obstante al no haber una relación lineal entre la señal MCD y el potencial hídrico estos valores en la zona de incertidumbre no pueden indicar el nivel de estrés hídrico.

La TCT diaria podría ser más interesante aunque su relación parcial con la demanda evaporativa la limita también. Por el contrario, la media de los TCT presentó un buen ajuste con el tamaño y caída del fruto y podría ser utilizado para la programación del riego durante la fase II. Por lo tanto tendría que tenerse en cuenta el uso conjunto del patrón de los diámetros máximos diarios y la TCT diaria para alcanzar una TCT media como objetivo de nivel de estrés.

Los niveles de estrés hídrico que se implantaron en los tratamientos durante los tres años de estudio redujeron el tamaño de fruto, pero la afección fue reversible en todos los casos con una rehidratación parcial. El nivel de estrés hídrico más severo incrementó la caída de fruto a nivel de ramo y aunque fue baja, influyó en la cosecha. De acuerdo a las relaciones obtenidas con el tamaño del fruto y los indicadores del estrés hídrico, niveles de -2,2 MPa de potencial hídrico al medio día, 20 MPa·día de integral de estrés y  $-10 \mu\text{m día}^{-1}$  de TCT media

durante la Fase II, podrían ser adecuados como estrategia de RDC. Durante el período de recuperación, el umbral de TCT de  $-5 \mu\text{m día}^{-1}$  empleado fue adecuado.

---

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Améglio T., Archer P., Cohen M., Valancogne C., Daudet FA., Dayau S. & Cruiziat P. (1999) Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant Soil*, **207**:155–167.
- Amouretti, M.C. 1996. ‘La fabricacion de aceite de oliva: una historia técnica original, in ‘Enciclopedia Mundial del Olivo’, Plaza y Jaén (Barcelona), pp. 26–29.
- Angelopoulos K., Dichio B. & Xiloyannis, C. (1996) Inhibition of photosynthesis in olive trees (*Olea europaea* L.) during water stress and rewatering. *Journal of Experimental Botany*, **47**, 1093–1100.
- Berger, A. & Selles, G. 1993. Diurnal fruit shrinkage: a model. In “Water transport in plants under climatic stress” (ed. by Borghetti, M., Grace, J., Raschi, A.), Cambridge University Press, London, 261-269.
- Behboudian M.H. & Mills T.M. (1997) Deficit irrigation in deciduous orchards. *Horticultural Reviews*, **21**, 105–131.
- Behboudian M.H. Marsal J. Girona J. & López G. (2011) Quality and yield responses of deciduous fruits to reduced irrigation. *Horticultural reviews*, **38**, 149–189.
- Bongi G. & Long S.P. (1987) Light-dependent damage to photosynthesis in olive leaves during chilling and high temperature stress. *Plant, Cell & Environment*, **10**, 241–249.
- Bowen C.A. Reitemeier R.F. & Fireman M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, **73**, 251–261.
- Boughalleb F. & Hajlaoui H. (2011). Physiological and anatomical changes induced by drought in two olive cultivars (cv Zalmati and Chemlali). *Acta Physiologiae Plantarum*, **33**, 53–65.
- Bouriaud O., Leban J-M, Bery D. & Deleuza C. (2005). Intra annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology*, **25**, 651-660.

- Bray E. (1993) Molecular response to water deficit. *Plant Physiology*, **103**, 1035–1040.
- Brought D.W., Jones H.G. & Grace J. (1986) Diurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation. *Plant, Cell & Environment*, **9**, 1–7.
- Caruso G., Rapoport H.F. & Gucci R. (2013) Long-term evaluation of yield components of young olive trees during the onset of fruit production under different irrigation regimes. *Irrigation Science*, **31**, 37–47.
- Castel J.R. & Fereres E. (1982). Responses of olive woody angiosperms to light intensity and humidity. *Canadian Journal of Botany*, **52**, 525–534.
- Čermák J., Kučera J., Bauerle W.L., Phillips N. & Hinckley T. M. (2007). Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, **27**(2), 181–198.
- Chaves M.M., Maroco J.P. & Pereira J.S. (2003). Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, **30**, 239–264.
- Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H. & Delzon S. (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, **491**, 752–755.
- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdieu D. & Gaudillère J.P. (2001) Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany*, **87**, 477–483.
- Chalmers D.J., Mitchell P.D. & Jerie P.H. (1985) The relation between irrigation, growth and productivity of peach trees. *Acta Horticulturae*. **173**, 283–288.
- Cherbiy-Hoffmann S.U., Hallb A.J. & Rousseaux M.C. (2013). Fruit, yield, and vegetative growth responses to photosynthetically active radiation during oil synthesis in olive trees. *Scientia Horticulturae*, **150**: 110–116.
- Cocoza, C., Giovannelli, A., Lasserre, B., Cantini, C., Lombardi, F. & Tognetti, R. (2012). A novel mathematical procedure to interpret the stem

- radius variation in olive trees. *Agricultural and Forest Meteorology*. **161**, 80-93.
- Cohen M. (1992) Optimización del riego a través de la utilización de indicadores de stress hídrico en el árbol. *Fruticultura Profesional*, **45**, 31–42.
- Connor D.J. (2005) Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, **56**, 1181–1189.
- Corell, M., Girón, I.F., Moriana, A., Dell’Amico, J., Morales, D. & Moreno, F. (2013). Extrapolating base-line trunk shrinkage reference equations across olive orchards. *Agricultural Water Management* 126:1-8.
- Cuevas, M.V., Torres-Ruiz, J.M, Álvarez, R., Jiménez, M.D., Cuerva, J. & Fernández, J.E. (2010). Usefulness of trunk diameter variations for irrigation scheduling in a mature olive tree orchard. *Agricultural Water Manage.* **97**, 1293–1302.
- Daudet F.A., Améglio T., Cochard H., Archilla O. & Lacoïnte A. (2004). Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of experimental Botany*. **56** (409), 135-144.
- Dell’Amico J., Moriana A., Corell M., Girón I.F., Morales D., Torrecillas A. & Moreno F. (2012) Low water stress conditions in table olive trees (*Olea europaea* L) during pit hardening produced a different response of fruit and leaf water relations. *Agricultural Water Management*, **114**, 11–17.
- Deslauriers A., Anfodillo T., Rossi S. & Carraro V. (2007). Using simple causal modeling to understand how wáter and temperatura affect daily stem variation in trees. *Tree physiology*. **27**,1125-1136.
- Diaz-Espejo A., Nicolás E. & Fernández. J.E. (2007). Seasonal evolution of diffusional limitations and photosynthetic capacity in olive under drought. *Plant, Cell & Environment*, **30**, 922–933.
- Dichio B., Nuzzo V., Xiloyannis C. & Angelopoulos K. (1997) Drought stress induced variation of pressure volume relationship in *Olea europea* L. cv Coratina. *Acta Horticulturae*, **449**, 401–409.

- Dichio B., Xiloyannis C., Angelopoulos K., Nuzzo V., Bufo S.A. & Celano G. (2003) Drought induced variations of water relations parameters in *Olea europaea*. *Plant and Soil*, **254**, 381–389.
- Dichio B., Xiloyannis C., Sofo A. & Montarano G. (2006) Osmotic regulation in leaves and roots of olive trees during water deficit and rewatering. *Tree Physiology*, **26**, 179–185.
- ESYRCE (2012). Encuesta sobre superficies y rendimientos. Análisis de las plantaciones de olivar en España. 30pp. Subdirección General de Estadística, SGT. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
- FAOSTAT (2012). <http://www.faostat.fao.org/corp/statistics/es>
- Fereres E. & Evans RG. (2006). Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrigation Science*. **24**:55-57.
- Fereres E. & Goldhamer D.A. (1990) Deciduous Fruit and Nut Trees Chap. 33. Pp. 987–1017 in: *Irrigation of Agricultural Crops*. (B.A. Stewart & D.R. Nielsen, editors). American Society of Agronomy, Madison.
- Fereres E., & Goldhamer D.A. (2004). Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, 23 (1): 11-19.
- Fernández, J.E. (2014). Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase. *Environmental and Experimental Botany*. **103**: 158–179.
- Fernández, J.E. (2014). Document Plant-based sensing to monitor water stress: Applicability to commercial orchards. *Agricultural Water Management*. **142**: 99-109.
- Fernández, J.E. & Cuevas M.V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*. **150**, 135–151.
- Fernández J.E., Díaz-Espejo A., Infante J.M., Duran P., Palomo M.J., Chamorro V., Girón I.F. & Villagarcía L. (2006) Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant and Soil*, **284**, 273–291.

- Fernández J.E., Green, S.R., Caspari H.W., Diaz-Espejo A. & Cuevas, M.V. (2008). The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines. *Plant and Soil*. 305, 91–104
- Fernández J.E., Moreno F., Cabrera F., Arrue J.L. & Martín-Aranda J. (1991) Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and Soil*, **133**, 239–251.
- Fernández J.E. & Moreno F. (1999) Water use by olive tree. *Journal of Crop Production*, **2**, 101–162.
- Fernández J.E., Moreno F., Girón I.F. & Blázquez O.M. (1997) Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant and Soil*, **190**, 179–192.
- Fernández J.E., Moreno F., Martín-Palomo M.J., Cuevas M.V., Torres-Ruiz J.M. & Moriana, A. (2011) Combining sap flow and trunk diameter measurements to assess water needs in mature olive orchards. *Environmental and experimental botany* **72**:330-338.
- Fernández J.E., Palomo M.J., Díaz-Espejo A., Clothier B.E., Green S.R., Girón I.F. & Moreno F. (2001) Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, **51**, 99–123.
- Fernández, J.E., Torres-Ruiz, J.M., Díaz-Espejo, A., Montero, A., Álvarez, R., Jiménez, M.D., Cuerva, J. & Cuevas, M.V. (2011). Use of maximum trunk diameter measurements to detect water stress in mature Arbequina olive trees under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. **98**:1813-1821.
- Ferré P.A. & Topp G.C. (2002). Time domain reflectometry. Pp.434–446 in: *Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods* (J.H. Dana & G.C. Topp, editors). American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Frank P.J., Drake P.L & Froend R.H. (2007) Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. *Plant, Cell & Environment*. **30**:19-30.

- Gee G.W. & Bauder J.W. (1986) Particle size analysis in: *Methods of soil analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy n° 9, 2nd edition, ASAk.
- Genard M., Fishman S., Vercambre G., Huguet J.G., Bussi C., Besset J. & Habib R. (2001). A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. *Plant Physiology*, **126**:188-202.
- Giorio P., Sorrentino G. & d'Andria R. (1999) Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, **42**, 95–104.
- Girma F.S. & Krieg D.R. (1992) Osmotic adjustment in Sorghum. I. Mechanisms of diurnal osmotic potential changes. *Plant Physiology*, **99**(2), 577–582.
- Girona J. (2002). Regulated deficit irrigation in peach. A global analysis. *Acta Horticulturae*, **592**:335-342.
- Goldhamer D.A. (1999) Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Horticulturae*, **474**, 369–372.
- Goldhamer D.A. & Fereres E. (2001) Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, **20**, 115–125.
- Goldhamer D.A. & Fereres E. (2004). Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, **23**(1): 11-19.
- Goldhamer D.A., Fereres E., Mata M., Girona J. & Cohen, M. (1999) Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **124**, 437–444.
- Gómez-del-Campo M. (2011). Summer deficit-irrigation strategies in a hedgerow olive orchard cv. 'Arbequina': effect on fruit characteristics and yield. *Irrigation Science*. **31**, 259-269.
- Gowing D. J., Davies W.L. & Jones H.G. (1990). A positive root sourced signal as an indicator of soil drying in apple, *Malus × domestica* Borkh. *Journal Experimental Botanic*, **41**, 1535-1540.

- Grattan S.R., Berenguer M.J., Connell J.H., Polito V.S. & Vossen, P.M., 2006. Olive oil production as influenced by different quantities of applied water. *Agricultural Water Management*. **85**, 133–140.
- Greenspan M.D., Schultz H.R. & Matthews M.A. (1996). Field evaluation of water transport in grape berries during water deficits. *Physiologia Plantarum*, **97**:55-62.
- Greenspan, M.D., Shackel, K.A. & Matthews, M.A. (1994). Developmental changes in the diurnal water budget of the grape berry exposed to water deficits. *Plant, Cell and Environment*, **17**:807-811.
- Halevy A.H. (1972) Water stress and the timing of irrigation. *HortScience*, **7**, 113–114.
- Hanan J.J. (1972) Repercussions from water stress. *HortScience*, **7**, 108–112
- Henin S., Gras R. & Monnier G. (1972) El perfil cultural in: C. Roquero de Laburu & J. García Caral (eds.). Mundi-Prensa, Madrid.
- Herzog K.M., Hüsler R. & Thum, R. (1995). Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees*. 10, 94-101.
- Hsiao T.C. (1990) Measurements of plant water status Chap. 9. Pp. 243–279 in: *Irrigation of agricultural crops* (B.A. Steward & D.R. Nielsen, editors). Agronomy Monograph, 30. American Society of Agronomy, Madison.
- Huguet J.G., Pelloux G. & Lorendeau J.Y. (1992). PEPISTA: Programmeur d'irrigation par les microvariations de diamètre de la plante. In: Proceedings of the Workshop on Real Time Sensing and Control of Automated Irrigation Systems. ICID, 16th European Regional Conference, Budapest (Hungary), 26 June 1992.
- Ingram J. & Bartels D. (1996) The molecular basis of dehydration tolerance in plants. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, **47**, 377–403.

- Iniesta F. , Testi L. & Orgaz F, (2009). The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy*, 30(4): 258-265.
- Johnstone P.R., Hartz T.K., LeStrange M., Nunez, J.J. & Miyao E.M, (2005). Managing fruit soluble solids with late-season deficit irrigation in drip-irrigated processing tomato production. *HortScience*, 40(6): 1857-1861.
- Jones H.G. & Cumming I.G. (1984). Variation of leaf conductance and leaf water potential in apple orchards. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, **59**, 329–336.
- Katerji N., Tardieu F., Bethenod O. & Quetin P. (1994). Behavior of Maize stem diameter during drying cycles: comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Science*, **34**, 165–169.
- Kaufmann M. R. & Hall A.E. (1974). Plant water balance and its relationship to atmospheric and edaphic conditions. *Agricultural Meteorology*, **14**, 85–98.
- Klepper B. (1968). Diurnal pattern of water potencial in woody plants. *Plant Physiology*, **43**, 1931–1934.
- Klepper B., Browing V.D. & Taylor H.M. (1971). Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, **48**, 683–685.
- Lakso A.N., Geyer A.S. & Carpenter S.C. (1984). Seasonal osmotic relations in apple leaves of different ages. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **109(4)**, 544–547.
- Larcher W., De Moraes J.A.P.V. & Bauer H. (1981) Adaptive responses of leaf water potencial, CO<sub>2</sub>-gas and water use efficiency of *olea eurepea* during drying and rewatering. Pp. 77–84 in: *Components of productivity of Mediterranean climate regions-Basic and applied aspects*. (N.S.Margari & H.A. Mooney, editors). Dr W Junk Publishers, The Hague.
- Lavee S., Hanoch E., Wodner M. & Abramowitch H. (2007) The effect of predetermined deficit irrigation on the performance of the cv. Muhasan

- olive (*Olea europaea* L.) in the eastern coastal plain of Israel. *Scientia Horticulturae*, **112**, 156–163.
- Lavee S. & Wodner M. (1991) Factors affecting the nature of oil accumulation in fruit of olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, **66**, 583–591.
- Lo Gullo M.A. & Salleo S. (1988) Different strategies of drought resistance in three Mediterranean sclerophyllous trees growing in the same environmental conditions. *New Phytologist*, **108**, 267–276.
- Magliulo V., D'Andria R., Lavini A., Morelli G. & Patumi, M. (2003). Yield and quality of two rainfed olive cultivars following shifting to irrigation. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, **78(1)**: 15–23.
- Mariscal M.J. Orgaz F. & Villalobos F.J. (2000) Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **100**: 183–197.
- Martin D.L., Stegman E.C. & Fereres E. (1991) Irrigation Scheduling Principles. Pp. 155–203 in: *Management of Farm Irrigation Systems*. (G.J. Hoffman, T.A. Howell, & K.H. Solomon, editors). American Society of Agricultural Engineers, Madison.
- McCutchan H. & Shackel K.A. (1992) Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L cv French). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **117**, 607–611.
- Myers B.J. (1988). Water stress integral a link between short term stress and longterm growth. *Tree Physiology*. **4**, 315–323
- Moreno F., Conejero W., Martín-Palomo M.J., Girón I.F. & Torrecillas, A. (2006). Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management*. **84(3)**: 290–294.
- Moreno F., Fernández, J.E., Clothie, B.E. & Green, S.R., (1996). Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil* **184**, 85–96.

- Moreno F., Vachaud G. & Martín-Aranda J. (1983). Caracterización hidrodinámica de un suelo de olivo. Fundamentos teóricos y métodos experimentales. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **42**, 695–721.
- Moriana A. & Fereres E. (2002) Plant Indicators for Scheduling Irrigation for Young Olive Trees. *Irrigation Science*, **21**, 83–90.
- Moriana A. & Fereres E. (2004) Establishing references values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Horticulturae*, **664**, 407–412.
- Moriana, A., Corell, M., Girón, I.F., Conejero, W., Morales, D., Torrecillas, A., Moreno, F. (2013). Regulated deficit irrigation based on threshold values of trunk diameter fluctuation indicators in table olive trees. *Scientia Horticulturae*. **164**, 102-111.
- Moriana A., Girón I.F., Martín-Palomo M.J., Conejero W., Ortuño M.F., Torrecillas A. & Moreno F. (2010). New approach for olive trees irrigation schedulings using trunk diameter sensors. *Agricultural Water Management*, **97**, 1822–1828.
- Moriana A., Fereres E., Orgaz F., Castro J., Humanes M.D. & Pastor M. (2000) The relations between trunk diameter fluctuations and tree water status in olive tree (*Olea europea* L). *Acta Horticulturae*, **537**, 293-297.
- Moriana A., Pérez-López D., Gómez-Rico A., Salvador M.d.l.D., Olmedilla N., Ribas F. & Fregapane G. (2007). Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics. *Agricultural Water Management*. **87**, 171-179.
- Moriana A., Moreno F., Girón, I.F., Conejero W., Ortuño M.F., Morales D., Corell M. & Torrecillas A. (2011). Seasonal changes of maximum daily shrinkage reference equations for irrigation scheduling in olive trees: influence of fruit load. *Agricultural Water Management*, **99**, 121–127
- Moriana A., Orgaz F., Pastor M. & Fereres E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **128**, 425–431.

- Moriana, A., Pérez-López, D., Prieto, M.H., Ramírez-Santa-Pau, M., Pérez-Rodríguez, J.M. (2012). Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. *Agricultural Water Management*. **112**, 43-54.
- Moriana A., Villalobos F.J. & Fereres E. (2002). Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. *Plant, Cell and Environment*. **25**, 395-405.
- Naor A., Peres M., Greenblat Y., Doron I., Gal Y. & Stern R.A. (2000). Irrigation and crop load interactions in relation to pear yield and fruit size distribution. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, **75**, 555–561.
- Natali S., Bignami C., Cammilli C. & Muganu M. (1999). Effect of water stress on leaf movement in olive cultivars. *Acta Horticulturae*, **474**, 445–448.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S. & Dean L.A. (1954) *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. U.S. Department of Agriculture. Report 939.
- Orgaz F. & Fereres E. (1997). Riego. Pp. 251–271 in: *El cultivo del olivo*. (D. Barranco, R. Fernández Escobar & L. Rallo, editores). Mundiprensa, Madrid.
- Orgaz F., Testi L., Villalobos F.J. & Fereres E. (2006). Water requirements of olive orchard-II: determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrigation Science*, **24**, 77–84.
- Ortuño M.F., Conejero W., Moreno F., Moriana A., Intrigliolo D.S., Biel C., Mellisho C.D., Pérez-Pastor A., Domingo R., Ruiz-Sánchez M.C., Casadesus J., Bonany J. & Torrecillas A. (2010). Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling?. A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, **97**, 1–11.
- Pastor M., García-Vila M., Soriano M.A., Vega V. & Fereres E. (2007). Productivity of olive orchards in response to tree density. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, **82**, 555-562.

- Palomo M.J., Díaz-Espejo A., Fernández J.E., Moreno F. & Girón I.F. (1999). Water balance in an olive orchard. Pp. 91. Proc. of the Third International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops. Estoril, Portugal, 28 junio - 2 julio.
- Pérez-López D., Gijón M.C. & Moriana A. (2008a). Influence of irrigation rate on the rehydration of olive tree plantlets. *Agricultural Water Management*, **95**, 1161–1166.
- Pérez-López, D., Moriana, A., Rapoport, H., Olmedilla, N. & Ribas, F. (2008b). New approach for using trunk growth rate and endocarp development in the irrigation scheduling of young olive orchards. *Scientia Horticulturae* 155:244-251
- Pérez-López D., Pérez-Rodríguez J.M., Moreno M.M., Prieto M.H., Ramírez-Santa-Pau M., Gijón M.C., Guerrero J. & Moriana A. (2013). Influence of different cultivars-locations on maximum daily shrinkage indicators: Limits to the reference baseline approach. *Agricultural Water Management*, **127**, 31–39.
- Pérez-López D., Ribas F., Moriana A., Olmedilla N. & De Juan A. (2007). The effect of irrigation schedules on the water relations and growth of a young olive (*Olea europaea* l.) orchard. *Agricultural Water Management*, **89**, 297–304.
- Pomper K.W. & Breen P.J. (1997). Expansion and osmotic adjustment of strawberry fruit during water stress. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122, 183-189.
- Proietti P., Palliotti A. & Nottiani G, (1999). Availability of assimilates and development of olive fruit. *Acta Horticulturae*, 474, 297-300.
- Rallo L. (1997) Fructificación y producción. Pp. 104–136 in: *El cultivo del olivo* (D. Barranco, R. Fernández-Escobar & L. Rallo, editors). MundiPrensa, Madrid.
- Rallo L. & Suárez, M.P. (1989). Seasonal distribution of dry matter within the olive fruit-bearing limb. *Advances in Horticultural Science*, **3**, 55–59.

- Rapoport H. (1997). Botánica y Morfología Capítulo 2. Pp. 33–58 in: *El cultivo del olivo* (D. Barranco, R. Fernández-Escobar & L. Rallo, editors). MundiPrensa, Madrid.
- Rapoport, H.F., Pérez-López, D., Hammami, S.B.M., Aguera, J. & Moriana, A. (2013). Fruit pit hardening: physical measurements during olive growth. *Annals of Applied Biology*. 163, 200-208.
- Shackel K.A., Ahmadi H., Biasi W., Buchner R., Goldhamer D., Gurusinghe S., Hasey J., Kester D., Krueger B., Lampinen B., McGourty G., Micke W., Mitcham E., Olson B., Pelletrau K., Philips H., Ramos D., Schwankl L., Sibbett S., Snyder R., Southwick S., Stevenson M., Thorpe M., Weinbaum S. & Yeager J. (1997) Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7, 23–29.
- Shackel K.A., Lampinen B., Southwick S., Olson W., Sibbett S., Krueger, W., Yeager J. & Goldhamer D. (2000). Deficit irrigation in prunes: maintaining productivity with less water. *HortScience*, 35, 30–33.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.A. & Hemmingsen, E.A. (1965). Sap pressure in vascular plant. *Science*. 148, 339-346.
- Tardieu F. & Davies W.J. 1992. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. *Plant Physiology*. 98, 540-545.
- Tardif J., Flannigan M. & Bergeron. 2001. An analysis of the daily radical activity of 7 boreal tree species. Northwestern Québec. *Monitoring & Environmental Analysis*. 67, 141-160.
- Tenhunen J.D., Pearcy R.W. & Lange O.L. (1987). Diurnal Variances in leaf conductance and gas exchange in natural environments. Pp. 323–351 in: *Stomatal function* (E. Zeiger, G.D. Farquhar & T.R. Cowan editors). Stanford University Press, Stanford.
- Tognetti R., D'Andria R., Sacchi R., Lavini A. Morelli G. & Alvino A. (2007). Deficit irrigation affects seasonal changes in leaf physiology and oil quality of *Olea europaea* (cultivars Frantoio and Leccino). *Annals of Applied Biology*. 150, 169-186.

- Tognetti R., Giovannelli A., Lavini A., Morelli G., Fragnito F. & d'Andria R. (2009) Assessing environmental controls over conductances through the soil-plant-atmosphere continuum in an experimental olive tree plantation of southern Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*. **149**, 1229–1243.
- Torres-Ruiz J.M., Diaz-Espejo, A., Morales-Sillero A., Martín-Palomo M.J., Mayr S., Beikircher B. & Fernández J.E. (2013). Shoot hydraulic characteristics, plant water status and stomatal response in olive trees under different soil water conditions. *Plant and Soil*. **373**, 77-87.
- Turner N. C. & Jones M.M. (1980). Turgor maintenance by osmotic adjustment: a review and evaluation. In Turner N.C. & Kramer P.J., eds, *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. Wiley-Interscience, New York, 87-103.
- Tyree M.T. & Jarvis P.G. (1982) Water in tissues and cells. Pp. 35–77 in: *Physiological Plant Ecology II: Water Relations and Carbon Assimilation* (O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler, editors). Springer-Verlag, Berlin.
- Tyree M.T. & Zimmerman M.H. (2002) Xylem structure and the ascent of sap.( T. E. Timell Editor ) Springer Series in Wood Science, New York.
- Wahbi S., Wakrim R., Aganchich B., Tahi H. & Serraj R.(2005). Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under arid climate: I. Physiological and agronomic responses. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **106**, 289-301.
- Walkley A. & Black I.A. (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed determination of the chromic acid titration method. *Soil Science*. **37**, 29–38.
- Xiloyannis C., Pezzarossa B., Jorba J. & Angelini P. (1988). Effects of soil water content on gas exchange in olive trees. *Advances in Horticultural Science*. **2**, 58-63.
- Yao C., Moreshet S. & Aloni B. (2001). Water relations and hydraulic control of stomatal behavior in bell pepper plant in partial soil drying. *Plant Cell and Environment*. **24**, 227-235.