



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TESIS DOCTORAL

Título
Respuesta del olivo (cv Arbequina) a riego deficitario bajo condiciones superintensivas en La Rioja
Autor/es
Julia Arbizu Milagro
Director/es
Alfonso Pardo Iglesias y José Miguel Peña Navaridas
Facultad
Facultad de Ciencias, Estudios Agroalimentarios e Informática
Titulación
Departamento
Agricultura y Alimentación
Curso Académico
2014-2015



**Respuesta del olivo (cv Arbequina) a riego deficitario bajo condiciones
superintensivas en La Rioja, tesis doctoral**

de Julia Arbizu Milagro, dirigida por Alfonso Pardo Iglesias y José Miguel Peña Navaridas
(publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia
Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los
titulares del copyright.



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

Departamento de Agricultura y Alimentación

**RESPUESTA DEL OLIVO (CV ARBEQUINA) A RIEGO
DEFICITARIO BAJO CONDICIONES
SUPERINTENSIVAS EN LA RIOJA**

Tesis Doctoral

PRESENTADA POR

JULIA ARBIZU MILAGRO

INGENIERO AGRÓNOMO

DIRIGIDA POR

ALFONSO PARDO IGLESIAS Y JOSÉ MIGUEL PEÑA NAVARIDAS

2015

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de una u otra forma me han ayudado a llegar aquí, y de forma muy especial:

A Alfonso Pardo Director de este trabajo, y a su esposa M^a Luisa Suso, a quienes debo todos mis conocimientos sobre riego deficitario aportados por los cinco años que compartimos en el CIDA. Gracias por haberme inculcado la pasión por la investigación y experimentación, gracias por todas las críticas constructivas recibidas, y gracias Alfonso por todos los comentarios, y correcciones del documento de Tesis.

A José Miguel Peña, Director de esta Tesis, que desde el primer momento confió en mí para el desarrollo de estos trabajos de riego deficitario en olivo en superintensivo, campo en el que ninguno de los dos había trabajado previamente. Agradecimiento muy especial tanto durante el proceso de trabajo en campo, así como en la parte teórica para la redacción de la tesis, con sus muchas correcciones, comentarios y en resumen por todo el apoyo y empuje recibido en los momentos críticos.

A Rafael Tomás, por su ayuda con los análisis estadísticos y por su apoyo y continuos ánimos en el último periodo de redacción de la Tesis.

A la finca “Kel Grupo Alimentario” que en colaboración con la Universidad de La Rioja nos permitió el desarrollo de la experimentación en campo, facilitándonos el planteamiento de las distintas estrategias de riego y la toma de datos en campo, así como la de los registros de los sensores de su propiedad.

A David, Carlos, Sheila y Fany, estudiantes de Ingeniería Técnica Agrícola y hoy profesionales del sector, que de forma desinteresada me ayudaron en la toma de datos en campo como parte de su formación, y que sin ellos no lo hubiese podido desarrollar de forma correcta. Gracias de todo corazón.

A los laboratorios de Tecnología de los Alimentos de la Universidad de La Rioja, y en especial a Carmen Olarte, que colaboró en la determinación de alguno de los parámetros de calidad de los aceites obtenidos.

A los Laboratorios Oficiales de La Grajera y a su personal, que pusieron a nuestra disposición la tecnología RMN para el análisis de los aceites.

A mi familia, especialmente a mis padres, que siempre han confiado en mí, y que siempre han sido un apoyo en los momentos difíciles.

A mi hermana Tere, que es la que me ha aguantado, apoyado, animado en los momentos bajos, que los hay, y ha posibilitado que siga adelante y que finalice esta Tesis.

*A mis padres Félix y Pili,
que me lo han dado todo
y siempre me han apoyado*

RESUMEN

El objetivo general de este trabajo fue estudiar distintas estrategias de riego para ahorrar agua en olivo en cultivo superintensivo en La Rioja, y adaptarlas a disponibilidades de agua limitadas.

Para este fin se desarrolló un ensayo durante tres años en una explotación comercial de olivo cv. Arbequina situado en el T. M de Quel en La Rioja, con una densidad de plantación 1.666 pies/Ha, dispuestos en emparrado. La finca disponía de una instalación de riego por goteo y el agua se suministraba desde un embalse de la propiedad, aunque el volumen no estaba garantizado puesto que el agua de riego procede de un cauce no regulado.

En el ensayo, el riego se aplicó desde comienzos de Abril hasta primeros de Diciembre y se compararon cinco tratamientos de riego: i) Control (CTL), regado al 100% de la ETc, ii) Riego deficitario controlado con estrés moderado (RDCEM), regado como CTL excepto en la fase II del crecimiento del fruto donde se regó al 50% del CTL; iii) Riego deficitario controlado con estrés severo (RDCEs), regado como CTL excepto en la fase II del crecimiento del fruto donde se regó al 25% del CTL, iv) Riego deficitario continuado (RD), que se regó con el 50% ETc, durante toda la estación de riego, v) Riego según dendrometría (Dendro), regado como CTL excepto en la fase II del crecimiento del fruto donde se regó cuando se observaban dos días de decrecimiento del diámetro máximo del tronco, medido por dendrometría, y aplicando la misma cantidad de agua de riego que el CTL en ese momento.

El RD produjo un descenso en el crecimiento de los árboles así como un descenso en los parámetros productivos, producción de aceituna por Ha, y producción de aceite por Ha, ocasionado fundamentalmente por la producción de un menor número de frutos. Este tratamiento fue el que mayor eficiencia del agua consiguió, respecto a la producción de aceite.

Los riegos deficitarios controlados, demostraron ser unas buenas estrategias para la obtención de un ahorro importante de agua, sin tener un efecto excesivo sobre el desarrollo vegetativo y productivo del árbol. Así pues el RDCEM consiguió un ahorro de agua del 18,9% y una producción de aceite acumulada en los tres años de ensayo

solo un 3% por debajo del CTL. El RDCES con un ahorro de agua del 28,3%, alcanzó una producción de aceite acumulada del 16% por debajo del CTL.

Por último la estrategia Dendro, con un ahorro de agua medio del 31,2%, ha conseguido una producción de aceite acumulado en los 3 años de un 7% más que el CTL, de forma que se presenta como una alternativa de riego con una alta eficiencia de agua.

En cuanto a la calidad de los aceites obtenidos, las distintas estrategias de riego estudiadas no alteraron la calidad de los aceites, pudiéndose clasificar todos ellos como Aceite de Oliva Virgen Extra, "Aceite de La Rioja".

INDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	IX
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1 SITUACIÓN DEL CULTIVO DEL OLIVO	3
1.2 LA INTENSIFICACIÓN DEL CULTIVO DEL OLIVO: CULTIVO INTENSIVO Y SUPERINTENSIVO.....	5
1.3 CÁLCULO DE LAS NECESIDADES DE AGUA DEL OLIVO.....	9
1.4 ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO APLICABLES EN OLIVO	9
1.4.1 <i>Fisiología y respuesta agronómica al PRD.....</i>	<i>12</i>
1.4.2 <i>Fisiología y respuesta agronómica al Riego Deficitario.....</i>	<i>12</i>
1.5 RESPUESTA DEL OLIVO AL RIEGO DEFICITARIO	15
1.6 LA MONITORIZACIÓN DEL RIEGO. CONTROL DEL ESTRÉS HÍDRICO.....	17
1.6.1 <i>Utilización de medidas basadas en el suelo</i>	<i>19</i>
1.6.2 <i>Utilización de medidas basadas en la planta</i>	<i>25</i>
1.7 EXPERIENCIAS DE RIEGO EN OLIVO UTILIZANDO DENDROMETRÍA	33
1.8 OBJETIVOS.....	35
2 MATERIALES Y MÉTODOS	39
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PARCELA Y DISEÑO EXPERIMENTAL	39
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE RIEGO	46
2.3 CÁLCULO DE LA ETC	50

2.4	APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE RIEGO.....	51
2.5	DENDROMETRÍA: DETERMINACIÓN DE LOS MOMENTOS DE RIEGO.....	52
2.6	DETERMINACIONES REALIZADAS.....	54
2.6.1	<i>Determinaciones realizadas sobre el desarrollo vegetativo del cultivo.....</i>	<i>55</i>
2.6.2	<i>Determinaciones de producción.....</i>	<i>58</i>
2.6.3	<i>Determinación de la calidad del aceite.....</i>	<i>65</i>
2.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS REALIZADOS.....	67
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
3.1	AGUA APLICADA EN LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS DE RIEGO	71
3.2	RESPUESTA DEL DESARROLLO VEGETATIVO A LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS DE RIEGO.....	80
3.2.1	<i>Desarrollo vegetativo medido por dendrometría. Tratamiento Dendro vs Control</i>	<i>80</i>
3.2.2	<i>Altura del árbol.....</i>	<i>87</i>
3.2.3	<i>Diámetro del tronco</i>	<i>93</i>
3.2.4	<i>Longitud de ramas laterales.....</i>	<i>99</i>
3.2.5	<i>Efectos globales de las estrategias de riego sobre los parámetros vegetativos ...</i>	<i>103</i>
3.3	RESPUESTA DE LOS PARÁMETROS PRODUCTIVOS AL RIEGO DEFICITARIO	105
3.3.1	<i>Nº de Flores y frutos cuajados.....</i>	<i>105</i>
3.3.2	<i>Efectos globales de las estrategias de riego sobre los parámetros productivos ...</i>	<i>110</i>
3.4	PRODUCCIÓN	110
3.4.1	<i>Evolución del peso de 100 aceitunas. Índice de Madurez</i>	<i>110</i>
3.4.2	<i>Producción de aceitunas.....</i>	<i>119</i>
3.4.3	<i>Rendimiento graso</i>	<i>121</i>

3.4.4	<i>Producción de aceite</i>	123
3.4.5	<i>Eficiencia del riego</i>	125
3.4.6	<i>Efectos globales de las estrategias de riego sobre la producción</i>	126
3.5	CALIDAD Y COMPOSICIÓN DE LOS ACEITES OBTENIDOS.	127
3.5.1	<i>Parámetros de calidad de los aceites: Acidez, Índice de peróxidos, K270 y K232.</i>	127
3.5.2	<i>Contenido en ácidos grasos</i>	130
4	CONCLUSIONES	135
5	REFERENCIAS	141

Índice de Tablas

Tabla 1. Evapotranspiración de referencia mensual (ET ₀) y pluviometría mensual acumulada (P) en los tres años de la experiencia (Año 2006, 2007 y 2008) según los datos obtenidos de la estación meteorológica de Autol.....	39
Tabla 2. Análisis de suelo de la parcela experimental a dos profundidades. Año 2006.....	40
Tabla 3. Análisis de micronutrientes en suelo de la parcela experimental a dos profundidades. Año 2006	40
Tabla 4. Análisis de granulometría del suelo (USDA) de la parcela experimental y clasificación del suelo a 30 y 60 cm. a tres profundidades. Año 2006.....	40
Tabla 5. Porcentaje de agua en el suelo a dos profundidades (30 y 60 cm). Año 2006.	41
Tabla 6. Análisis de agua de riego de la parcela de ensayo. Año 2006.	44
Tabla 7. Fertilización aplicada en la finca durante los años de ensayo.	45
Tabla 8. Descripción esquemática y siglas con las que se identifican los Tratamientos de riego aplicados en el ensayo.....	48
Tabla 9. Medidas realizadas en los árboles control y momentos de efectuarlas.....	55
Tabla 10. Medidas y Determinaciones de producción realizadas en los árboles control y momentos de efectuarlas.....	65
Tabla 11. Evapotranspiración potencial mensual (ET ₀), precipitación mensual acumulada (P ac.), coeficiente de cultivo (K _c) y coeficiente de sombreo (K _s), y Evapotranspiración de cultivo mensual (ET _c) en los años de ensayo (Año 2006, 2007 y 2008).	71
Tabla 12. Precipitaciones efectivas mensuales (mm/mes) calculadas según el método descrito por Brouwer y Heibloem	73
Tabla 13. Agua aplicada mensualmente (mm) en cada uno de los tratamientos de riego durante los 3 años de la experiencia.....	74

Tabla 14. Número de días de riego durante el periodo de riego deficitario (Julio y Agosto) en el tratamiento Dendro en comparación con el Control (riego diario), en los tres años de experiencia.	77
Tabla 15. Ahorro de agua de riego anual (%) en los distintos tratamientos con respecto al Control (Año 2006, 2007 y 2008).	79
Tabla 16. Crecimiento absoluto en altura de árbol (cm) durante la campaña de riego en el año 2006 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	88
Tabla 17. Crecimiento absoluto en altura de árbol (cm) durante la campaña de riego en el año 2007 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	90
Tabla 18. Crecimiento absoluto en altura de árbol (cm) durante la campaña de riego en el año 2008 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	91
Tabla 19. Crecimiento absoluto del diámetro del tronco (mm) durante la campaña de riego en el año 2006 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	94
Tabla 20. Crecimiento absoluto del diámetro del tronco (mm) durante la campaña de riego en el año 2007 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	96
Tabla 21. Crecimiento absoluto del diámetro del tronco (mm) durante la campaña de riego en el año 2008 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	97
Tabla 22. Crecimiento absoluto de las ramas laterales (cm) y crecimiento relativo (%) durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	102
Tabla 23. Crecimiento acumulado al final de la experiencia en cuanto a altura del árbol (cm), diámetro de tronco (mm) y crecimiento medio de ramas laterales (cm). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	104
Tabla 24. Número de flores por brote durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	105
Tabla 25. Número de frutos cuajados por brote durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	106

Tabla 26. . Numero de flores y frutos cuajados por cm de rama durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	109
Tabla 27. Tasa de cuajado de frutos por brote (%) durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	109
Tabla 28. Peso seco de 100 aceitunas (g) en el momento de la recolección en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	113
Tabla 29. Índice de Madurez (IM) en el momento de la cosecha para los tres años de la experiencia.(Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	116
Tabla 30. Índice de Madurez, contenido en humedad y contenido en grasa del fruto de Arbequina en cultivo superintensivo en relación a la fecha de recolección y a los tratamientos de riegos aplicados en los tres años de estudio 2006, 2007 y 2008	117
Tabla 31. Producción de aceitunas en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y producción acumulada. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	120
Tabla 32. Rendimiento graso industrial en el momento de la cosecha medido por el método Abencor para las distintas estrategias de riego en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y el promedio de los tres años. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	122
Tabla 33. Producción de aceite por unidad de superficie (Kg aceite /Ha) para las distintas estrategias de riego en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y producción acumulada de los tres años. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	123
Tabla 34. Eficiencia hídrica de los tratamientos medida como la producción de aceite por unidad de agua aplicada (Kg aceite /mm agua aplicada) para las distintas estrategias de riego en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y producción acumulada de los tres años. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	125
Tabla 35. Características físico-químicas de los aceites producidos en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) en los distintos tratamientos riego. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$	127

Tabla 36. Contenido en ácidos grasos de los aceites producidos en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) en los distintos tratamientos riego. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$130

Índice de figuras

Figura 1. Evolución de la producción de aceite de oliva, de la exportación, del consumo nacional y de la importación en España durante las campañas 2007-2014. Fuente: El País 22 de febrero de 2015. 4	
Figura 2. Crecimiento del tronco de un olivo de 37 años. (Fernández y Cuevas, 2010).....	28
Figura 3. Parámetros derivados de las fluctuaciones del diámetro del tronco en dos días consecutivos (Goldhamer y Fereres, 2001).....	29
Figura 4. Evolución del crecimiento diario de tronco ($\mu\text{m}/\text{día}$) en el tratamiento Dendro a lo largo del periodo de parada vegetativa estival (Julio-Agosto) en los tres años de la experiencia, y riegos aplicados en cada uno de los años de ensayo en respuesta a decrecimientos del tronco de dos días consecutivos.....	76
Figura 5. Evolución de la humedad del suelo (%) a 20 y 50 cm de profundidad en el tratamiento Dendro previa y durante el periodo de riego deficitario (desde el 10 de junio al 5 de Septiembre) en los tres años de experiencia. El gráfico de barras representa las lluvias y los riegos aplicados en el periodo estudiado.....	78
Figura 6. Comportamiento del crecimiento del diámetro del tronco (μm) en periodos de baja demanda evaporativa y disponibilidad de agua en el suelo. Los datos corresponden a los días 07/04/2008 a las 00:00 hasta el 08/04/2008 a las 24:00.....	81
Figura 7. Comportamiento del crecimiento del diámetro del tronco en periodos de alta demanda evaporativa y baja disponibilidad de agua en el suelo. Los datos corresponden a los días 06/08/2008 a las 00:00 hasta el 07/08/2008 a las 24:00.....	81
Figura 8. Comportamiento del crecimiento del diámetro del tronco en periodos de baja demanda evaporativa y disponibilidad de agua en el suelo. Los datos corresponden a los días 07/06/2008 a las 00:00 hasta el 08/06/2008 a las 24:00.....	82
Figura 9. Evolución del diámetro máximo de tronco en el tratamiento Control y Dendro a lo largo de la campaña de riego, para los tres años de la experiencia.....	84
Figura 10. Detalle de la evolución del diámetro máximo de tronco (μ) y de la humedad volumétrica del suelo (%) a 20 cm en los tratamientos Control y Dendro del Año 2006. Las barras verticales representan los riegos aplicados a cada tratamiento y lluvia durante el periodo de parada vegetativa.....	85

Figura 11. Evolución de la altura de los olivos (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2006. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.87

Figura 12. Evolución de la altura de los olivos (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2007. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.89

Figura 13. Evolución de la altura de los olivos (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2008. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.91

Figura 14. Crecimiento medio en altura de los olivos (cm) de los diferentes tratamientos de riego durante los tres años de experiencia. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.92

Figura 15. Evolución del diámetro medio del tronco (mm) de los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2006. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.94

Figura 16. Evolución del diámetro medio del tronco (mm) de los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2007. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.95

Figura 17. Evolución del diámetro medio del tronco (mm) de los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2008. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.97

Figura 18. Crecimiento medio del diámetro (mm) de los olivos durante los tres años de experiencia en los distintos tratamientos de riego.98

Figura 19. Evolución del crecimiento medio de ramas laterales (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las distintas fases de crecimiento en los años 2006, 2007 y 2008...101

Figura 20. Evolución del peso de 100 frutos (g) desde el inicio de la parada vegetativa estival (mediados de Julio) hasta la cosecha (primeros de Noviembre), en los tres años de la experiencia, año 2006, 2007 y 2008. Los segmentos verticales representan el error típico.111

Figura 21. Evolución del Índice de Madurez a lo largo del mes de Octubre hasta la cosecha, en los tres años de la experiencia, año 2006, 2007 y 2008. Los segmentos verticales representan el error típico.....114

Índice de Fotografías

Fot. 1. Explotación intensiva de olivos en La Rioja	6
Fot. 2. Explotación superintensiva de olivos en La Rioja	7
Fot. 3. Recolección mediante maquinas autopropulsadas cabalgantes en una explotación de olivos en cultivo superintensivo de La Rioja.....	8
Fot. 4. Sonda FDR en el momento de su instalación	23
Fot. 5. Sonda FDR para mediciones puntuales a través de un tubo de acceso.	24
Fot. 6. Dendrómetro instalado en el tronco de un olivo adulto.....	26
Fot. 7. Instalación de un dendrómetro en un olivo joven	31
Fot. 8. Instalación de sensor para la medida del flujo de savia	32
Fot. 9. Calicata en la zona de ensayo.....	42
Fot. 10 . Bulbo húmedo desarrollado por los goteros de riego en las parcelas de ensayo.	43
Fot. 11. Vista general de la parcela de ensayo. Se pueden observar diferencias vegetativas y productivas, según el tratamiento.	46
Fot. 12. Vista de la válvula que regula la aplicación de agua. En este caso corresponde a Riego Deficitario (RD)	47
Fot. 13. Fotografía del satélite LANDSAT de resolución 100 m x 100m del sector de la finca donde se realizó la experimentación. Cuadro rojo ubicación de las parcelas experimentales.	51
Fot. 14. Sensor C-Probe instalado en una de las estaciones Verdtech de la finca.	53
Fot. 15. Estación Verdtech instalada en una de las parcelas experimentales de la finca	54
Fot. 16. Toma de datos de parámetros de crecimientos vegetativo, altura del árbol, en las parcelas de ensayo	56
Fot. 17. Árboles de una parcela de ensayo con etiquetas indelebles para marcar las ramas en las que se hacían las determinaciones de crecimiento vegetativo y productivo.	57

Fot. 18. Inflorescencia en plena floración	58
Fot. 19. Aspecto de las inflorescencias tras el cuajado y caída de frutos.....	59
Fot. 20. Muestra de aceitunas sobre las que se determinaba el Índice de madurez según el método propuesto por el INIA de escala de color 0-7.....	60
Fot. 21. Esquema de las distintas partes que componen un Extractor Soxhlet con fuente de calor por “baño maría”	62
Fot. 22. Extractor Abencor donde se procesaron las muestras (Laboratorios oficiales de La Grajera, en Logroño (La Rioja).....	63
Fot. 23. Equipo de RMN modelo Broker Avance 400 de los laboratorios oficiales de La Grajera donde se realizaron los análisis de calidad del aceite.	67

Introducción y Objetivos

1 Introducción y Objetivos

1.1 Situación del cultivo del olivo

El cultivo del olivo a nivel mundial se concentra en países de clima mediterráneo en los cuales ocupa unas 9,5 millones de hectáreas. En España se estima la superficie de los olivos en unos 2,6 millones de hectáreas, algo más del 25% de la superficie mundial, lo que nos coloca en primera posición en número de hectáreas. (MAGRAMA, 2014).

La producción mundial de aceitunas se sitúa en una media anual de unos 15 millones de toneladas de las cuales se destinan un 90% a la producción de aceite y un 10% se consumen como aceitunas de mesa. España vuelve a ser en este apartado la primera productora mundial con unos 7 millones de Tm de aceituna y se estima el volumen de aceite producido en España en unos 1,8 millones de litros de aceite de oliva, (MAGRAMA, 2014) cifra record alcanzada en 2014.

La mayoría de los olivos mundiales se cultivan en secano (un 90% del total) lo que convierte al agua en el principal factor limitante del cultivo. Como consecuencia de lo anterior, la olivicultura tradicional ha utilizado densidades de plantación muy bajas con lo que cada árbol individualmente adquiría vigores muy elevados. La recolección se realizaba de manera manual golpeando las ramas y/o los frutos. Para facilitar su desprendimiento del árbol en muchas ocasiones los frutos estaban sobremadurados y las aceitunas se tiraban al suelo para ser recogidas después desde el suelo, con un toldo o (en el peor de los casos) con una barredora, lo que no garantizaba en absoluto la calidad del aceite conseguido de estas aceitunas.

Tras el final de la segunda guerra mundial se inicia el éxodo del campo a la ciudad, proceso que desencadena la necesidad de una agricultura mecanizada y se expande progresivamente en los diferentes países europeos según su estado de desarrollo. En España este proceso se produce en los años 60. La progresiva intensificación de la olivicultura es una consecuencia de estos movimientos migratorios que despueblan constantemente el medio rural. (Rallo, L., 2007).

El comienzo de la nueva olivicultura se inicia con el Tratado de Olivicultura de Moretinni. El profesor italiano indicaba en los años 50 que se debía incrementar el número de árboles por hectárea para disminuir el tamaño de los mismos y poder

aplicar nuevas técnicas de mecanización, uso de fertilizantes, riego, etc. Esta intensificación, puesta en entredicho en un principio, ha ido dando paso a dos tipos de cultivo que conviven en la actualidad y de los que hablaremos en el siguiente apartado: el cultivo intensivo y el cultivo superintensivo (Navarro Velasco, A., 1961).

El primero de ellos ha venido de la mano de las investigaciones realizadas por organismos públicos, fundamentalmente en Andalucía. El segundo es fruto de la iniciativa privada del sector viverístico y de fabricación de maquinaria (Rallo, L., 2007). Independientemente del grado de intensificación de la olivicultura, muchas de las nuevas plantaciones se colocan en parcelas de regadío para incrementar su productividad.

Además de lo anterior, el aceite de oliva en la actualidad ha pasado a ser considerado como un alimento cardiosaludable y un integrante fundamental de la denominada “dieta mediterránea”. Al amparo de ello han aparecido varias denominaciones de origen y muchas almazaras se han modernizado adquiriendo modernos sistemas de extracción por centrifugas para garantizar la calidad.

El consumo interno y sobre todo, el aumento de las exportaciones hacen que España necesite más aceite del que produce, lo que ha llevado a un aumento de los precios percibidos por el agricultor.

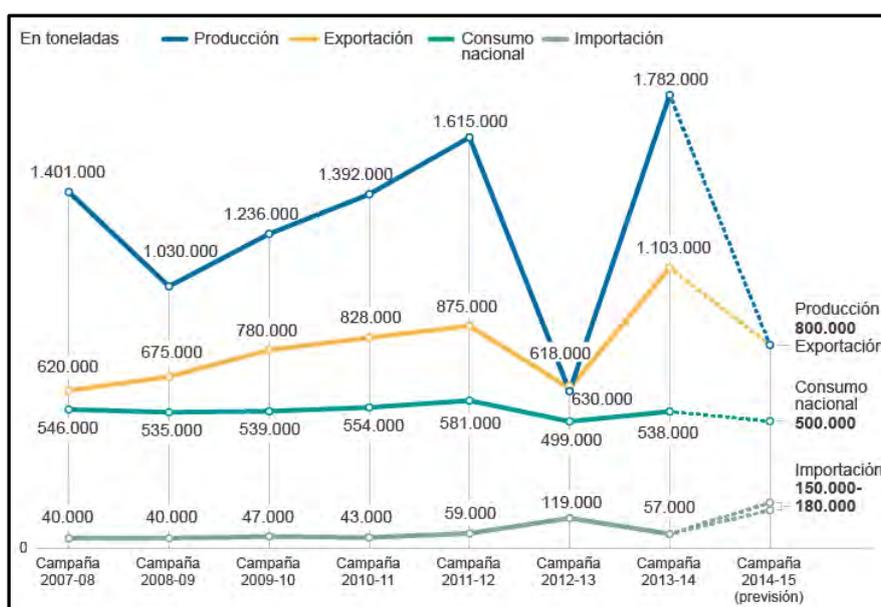


Figura 1. Evolución de la producción de aceite de oliva, de la exportación, del consumo nacional y de la importación en España durante las campañas 2007-2014. Fuente: El País 22 de febrero de 2015.

La situación en La Rioja ha evolucionado de una manera similar que responde a las características de la agricultura y del mercado. En el catastro del Marqués de la Ensenada de 1751, los olivos se extendían por todo el Valle del Ebro incluyendo la Rioja Alta, con cerca de 10.000 has de olivar y 42 trujales de elaboración, pero dejaron de ser interesantes para el agricultor y fueron sustituidos por viñas, de manera que en el año 1992 se llega a una situación totalmente distinta: sólo quedaban 2.500 Has de cultivo y 12 trujales cooperativos que elaboraban con el antiguo sistema de prensas y entregaban el aceite producido a los socios, sin que podamos decir que exista una comercialización propiamente dicha. (Fernández Alcázar, J.L., 2014)

A partir de este momento la situación cambia radicalmente. Desde 1994 la superficie de olivos ha crecido un 124 % y alcanza en 2014 las 5.800 Has con 24 trujales, de los que 16 elaboran por el moderno sistema de centrifugas (sistema de dos fases). Las causas vuelven a ser las anteriores: aumento de la demanda (y por lo tanto del precio) al amparo de la DOP Aceite de La Rioja, y plantaciones de Arbequina en regadío con conducción intensiva o superintensiva (Fernández Alcázar, J.L., 2014).

1.2 La intensificación del cultivo del olivo: cultivo intensivo y superintensivo

La situación mundial se está transformando de manera muy rápida. El aumento del consumo de aceite de oliva considerado como un alimento cardiosaludable y la creación de nuevas y modernas almazaras ubicadas en muchas ocasiones en nuevas DOP han aumentado la demanda de aceitunas de calidad y subido los precios de los percibidos por el agricultor (Rallo, L., 2007). Los cultivadores buscan aumentar la rentabilidad e introducen una serie de cambios tecnológicos en el cultivo que permiten iniciar la olivicultura intensiva como una alternativa a la olivicultura tradicional. Las características principales atribuidas a este sistema se basan en acortar al máximo el periodo improductivo de la plantación, aprovechar al máximo el potencial productivo del medio, diseñar una plantación con un grado de mecanización más elevado en todas las operaciones de cultivo y no realizar plantaciones en un medio en el que, a priori, existan factores limitantes desde el punto de vista del clima (heladas, sequía, etc.) o de suelo (terrenos muy pesados, poco profundos, con problemas de *Verticillium*, etc.).

En el sistema intensivo se utilizan densidades de plantación de 300 a 400 árboles por hectárea (Fot. 1), con marcos de plantación de 5 x 5 m o 6 x 6 m. La

entrada en producción se sitúa el tercer o cuarto año y la plena producción se alcanza al cabo de 7 años. Las producciones medias se pueden situar entre los 2-4.000 kg/Ha en secano y los 8-10.000 kg/Ha en regadío.



Fot. 1. Explotación intensiva de olivos en La Rioja

Los sistemas de formación tienden a acelerar el crecimiento de la planta y la entrada en producción, simplificar las operaciones de poda y predisponer al árbol para una recolección mecanizada. En este sentido, lo más habitual es la formación con un solo tronco, de alzada 1,0-1,2 m y la recolección por medio de vibradores multidireccionales.

Con el objetivo de conseguir altas producciones en un periodo de tiempo corto y de conseguir una mecanización total y más rápida de la recolección, el siguiente paso se produce a principios de los años 90, en los cuales se van a comenzar a realizar en distintas regiones españolas plantaciones con densidades superiores a los 1.000 árboles por hectárea. Estos sistemas, denominados de alta densidad o superintensivos, se caracterizan por tener entre 1.000 y 2.500 plantas por hectárea (Fot. 2).

En estos casos, los principales factores limitantes a la hora de determinar el marco de plantación son la disponibilidad de agua y la iluminación.



Fot. 2. Explotación superintensiva de olivos en La Rioja.

La disponibilidad de agua será tratada más adelante. En cuanto a la iluminación hemos de pensar que la anchura entre líneas ha de ser la suficiente para evitar la sombra de unos árboles sobre los contiguos (Santos et al., 2008). Por ello, los marcos de plantación más habituales sitúan la distancia entre filas entre 2,5 y 4,0 m.

En este nuevo tipo de plantaciones, los árboles se forman en un eje que se apoya en un tutor y se colocan en hileras a una distancia que suele oscilar entre 1,5 y 2,0 m, lo que hace que, al cabo de pocos años se haya formado un seto que entra en producción de manera muy rápida. Este sistema requiere, por lo tanto, árboles poco vigorosos, que tiene limitada su altura a unos 2,5 m. Es por ello que la inmensa mayoría de las plantaciones superintensivas se realizan con una variedad poco vigorosa: la Arbequina. Resulta necesario además un sistema muy sencillo de postes y alambres sobre los cuales se apoya el tutor (normalmente de bambú) encargado de guiar al árbol al menos durante los primeros años. (Peña et al., 2007).

En estas plantaciones la entrada en producción se produce al cabo de 3 años y con cosechas significativas que pueden superar los 2.000 Kg/Ha. Esta producción aumenta progresivamente hasta el séptimo año, momento en el cual se pueden alcanzar medias de 10.000 a 15.000 Kg/Ha. (León et al., 2007; Matéu, J. 2007).

La principal ventaja de este tipo de formación reside en que se hace posible la recolección mecanizada mediante máquinas autopropulsadas cabalgantes, lo que supone una disminución drástica de la mano de obra necesaria para la recolección y un manejo muy cuidadoso del fruto que no recibe golpes ni es recogido del suelo. Los

elevados rendimientos alcanzados por las máquinas producen una importante disminución de los costes de producción. (Matéu, J., 2007).

Los inconvenientes se engloban en dos aspectos: por un lado, los mayores costes de implantación del cultivo, dados por la adquisición de un mayor número de plantas y la necesidad de colocación de tutores, frecuentemente apoyados en un sistema de postes y alambres; y por otro lado, las dificultades para el manejo del vigor en estas plantaciones, que implican que el diseño de las mismas tenga que tener en cuenta la altura máxima a alcanzar para el paso de la máquina de recolección y el desarrollo vegetativo para una suficiente insolación y fructificación de los árboles. (Pastor et al., 2006).



Fot. 3. Recolección mediante máquinas autopropulsadas cabalgantes en una explotación de olivos en cultivo superintensivo de La Rioja.

En la actualidad no existen variedades de olivo menos vigorosas que las tradicionales y tampoco disponemos de patrones enanizantes capaces de controlar el tamaño de los árboles que dispongamos sobre ellos. Por lo tanto, es muy importante en el sistema de cultivo en seto la aplicación de técnicas de cultivo adecuadas, especialmente en lo referente al riego, a la fertilización y a la poda. (Tous et al., 2003).

1.3 Cálculo de las necesidades de agua del olivo

La estimación de las necesidades hídricas de los cultivos se realiza, habitualmente, mediante balances hídricos en el suelo o mediante métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial basados en parámetros climáticos y coeficientes de cultivo, siendo la metodología FAO (Allen et al., 1998) la que se usa con más frecuencia. En este sentido es de señalar el avance y el esfuerzo que han efectuado los distintos servicios de asesoramiento al regante con sus redes de estaciones agroclimáticas y la puesta a disposición de los regantes de datos climáticos de forma rápida, fiable y asequible.

A pesar de estos esfuerzos, la estimación de la Evapotranspiración del cultivo todavía adolece de poca precisión. No existen experiencias suficientes que hayan contrastado los escasos datos del coeficiente de cultivo de los que se dispone. Por añadidura, la gran mayoría de estas experiencias se han realizado en olivos conducidos de forma “tradicional” y no existen datos suficientes en la bibliografía referentes al cultivo en seto superintensivo.

1.4 Estrategias de riego deficitario aplicables en olivo

El olivo es un árbol típico de clima mediterráneo que se ha cultivado tradicionalmente en secano por resultar bastante tolerante a la sequía. Esto es debido a que dispone de mecanismos de regulación de la apertura y cierre de estomas que le permiten evitar la deshidratación en periodos de déficit hídrico (Feres et al., 1996). Estos procesos evitan la muerte de la planta y le garantizan su supervivencia en momentos muy críticos, pero no pueden impedir que los procesos de crecimiento y producción se vean alterados en condiciones de déficits severos. Así, el crecimiento vegetativo se ve disminuido, se reduce el número de flores, se aumenta el fenómeno de vecería y disminuye el tamaño del fruto y su contenido en aceite en condiciones de estrés hídrico (Orgaz y Fereres, 2001).

La bibliografía cita una gran variedad de adaptaciones morfológicas y fisiológicas al déficit hídrico como son: la regulación de la apertura de los estomas y la transpiración (Nogués and Baker, 2000), la regulación del intercambio gaseoso (Xiloyannis et al., 2004), la aparición de alteraciones en la anatomía de la hoja (Chatzoulakis et al., 1999), la capacidad de extraer agua del suelo debido a su profundo sistema radicular y a su alta diferencia de potencial entre la parte vegetativa

y la raíces (Fernández et al., 1997, Xiloyannis et al., 2004) y un sistema muy desarrollado de ajuste osmótico (Dichio et al., 2006). Además de lo anterior, Patumi et al. (2002) comprobaron que en condiciones de estrés las aceitunas tenían un mayor grosor de la cutícula para prevenir la pérdida de agua y de nutrientes.

A pesar de ello, es evidente que la producción del olivo aumenta considerablemente cuando dispone de agua (Pastor et al., 1998). Pero por desgracia, la zona mediterránea de cultivo y La Rioja en particular se caracterizan por un importante déficit hídrico en los meses de verano. Son frecuentes las ocasiones en que la demanda hídrica no puede ser satisfecha con los recursos disponibles, por lo que es necesario usar estrategias de Riego Deficitario (RD). Es imprescindible por lo tanto realizar la adecuada programación para optimizar los recursos.

El concepto de Riego Deficitario (RD) se introduce a finales del siglo pasado y es una estrategia que pretende reducir la aplicación de agua para mejorar su productividad. Consiste, básicamente, en aplicar de forma sistemática una cantidad de agua menor que la necesaria para suplir las necesidades completas del cultivo (Ruiz Sánchez et al., 2010). En este sentido, es de vital importancia conocer cuánto podemos llegar a reducir el agua aportada sin que se produzca una disminución de la producción, ni en cantidad ni en calidad, con respecto a los árboles plenamente regados, de manera que la correcta aplicación del RD requiere un conocimiento profundo de las respuestas del árbol a déficits hídricos, así como de unos instrumentos fiables para la medida del estrés (Cuevas et al., 2010). Como es sabido, la disminución del aporte de agua se traduce en una menor tasa de crecimiento del cultivo porque se reduce la síntesis de carbohidratos como consecuencia de la disminución de la transpiración. En el caso del olivo este crecimiento restringido permite una mayor entrada de la luz y una mejora en los fenómenos de iniciación y diferenciación de las yemas. Esto significa que la producción del año siguiente tampoco debería estar afectada por la reducción del aporte de agua.

El concepto de productividad del agua es clave para entender la extensión actual de las estrategias de RD y se define como la relación entre el rendimiento del cultivo y el agua consumida por el mismo para alcanzarlo (Geerts y Raes, 2009).

La situación de los regadíos españoles y riojanos, en ocasiones en precario, no puede garantizar el suministro de agua, bien por sus limitaciones en dotación, bien porque dependa de factores externos que no se puedan predecir (sequías, decisiones

políticas de reparto de agua, etc.). En este caso hablamos de Riegos Deficitarios “Incontrolados”. Sin embargo, cuando el aporte de agua es continuo porque la fuente de suministro lo garantiza o porque el agua se ha almacenado en embalses o balsas, podemos hablar de Riegos Deficitarios “Con Control”.

En todos los casos de este tipo de Riegos Deficitarios “Con Control” hablamos de la reducción en la cantidad de agua que se aplica. Esta reducción en el consumo de agua para incrementar su productividad puede adoptar tres estrategias diferentes:

1. El Riego Deficitario Controlado (RDC), que es una estrategia mediante la cual se aplica agua en cantidades menores a las necesarias para cubrir la ETc en determinados periodos fenológicos del árbol en los cuales se supone que los parámetros productivos no van a verse alterados. Por el contrario, en los momentos del ciclo en los cuales una falta de agua puede suponer una disminución de la cosecha en cantidad o en calidad, la plantación recibe la cantidad de agua necesaria para cubrir su ETc. Desde este punto de vista se acepta que el estrés hídrico provocado por la falta de agua en algunos momentos puede tener mayores o menos consecuencias en función de la fenología del árbol y de la intensidad y de la duración del estrés. Es decir, es una estrategia basada en una disminución de la cantidad de agua aplicada en el tiempo.
2. El Riego Deficitario Sostenido (RDS), estrategia parecida a la anterior pero en la que se distribuye el déficit de aportaciones de agua de forma uniforme a lo largo de todo el ciclo del cultivo para intentar evitar un periodo concreto de estrés muy severo que pudiera generar problemas indeseables (Goldhamer et al., 2006). Desde este punto de vista es también una estrategia basada en una disminución de la cantidad de agua aplicada en el tiempo.
3. El secado parcial de la zona radicular o PRD (del inglés, Partial Rootzone Drying), que consiste en mantener la mitad de la zona radicular del árbol con suficiente agua, mientras que la otra mitad no se riega y permanece seca. La zona húmeda y seca se van alternando habitualmente cada 15 días y a lo largo de la línea de la plantación. Es necesario disponer, por lo tanto, de dos líneas de goteros a ambos

lados del árbol que puedan ser accionadas de manera independiente, o de otro tipo de sistema que permita el manejo diferenciado de la humedad del suelo. En este caso es una estrategia basada en una disminución de la cantidad de agua aplicada en el espacio.

1.4.1 Fisiología y respuesta agronómica al PRD

Se ha observado en varias especies de árboles frutales que cuando parte del sistema radicular comienza a secarse las raíces de esa zona comienzan a generar ácido abscísico (ABA) cuyas señales se transportan vía xilema a las hojas y producen la respuesta de un cierre estomático, al menos parcial. Este cierre produce un descenso de la pérdida de agua por transpiración con muy poca disminución de la fotosíntesis, dado que la parte de las raíces que están recibiendo agua son capaces de mantener un potencial hídrico similar al que tiene las plantas plenamente regadas.

La respuesta agronómica obtenida mediante la utilización de esta estrategia no parece estar del todo clara. En algunos cultivos, como la viña, se han obtenido vendimias superiores en cantidad y calidad cuando se la compara con un riego localizado convencional (De Lahera et al., 2007) o incluso cuando se la compara con un RDC (Dos Santos et al., 2007). Sin embargo, en el resto de los cultivos no parece existir una ventaja evidente frente al RDC si las cantidades de agua aportadas son las mismas: aunque el sistema pudiera ser el responsable de la disminución de la transpiración, no existe la necesidad de alternar las zonas de riego para alcanzar este objetivo (Marsal et al., 2008b).

1.4.2 Fisiología y respuesta agronómica al Riego Deficitario

Los diferentes estudios llevados a cabo para poder realizar mediciones de los efectos de una restricción de agua durante distintos estado fenológicos del árbol han permitido identificar los periodos críticos en los cuales la planta es extremadamente sensible al déficit hídrico. Esta información de partida es básica para poder aplicar con éxito una estrategia de RD.

a) Relaciones hídricas

La reducción del contenido de humedad del suelo es una de las primeras señales que pueden utilizarse como un indicador del estrés. Bajo RDC, esta reducción ha de producirse en momentos muy concretos

dependiendo del estado fenológico del cultivo. Por lo tanto, es muy conveniente poder monitorizar el contenido de humedad del suelo. En ese sentido existen en el mercado distintos equipos para medir la humedad del suelo: tensiómetros, bloques de yeso, sondas de capacitancia, sondas TDR, etc. que van a ser objeto de estudio en otro apartado.

De la misma manera, el potencial hídrico de la hoja (ψ_{hoja}) o del tallo (ψ_{tallo}) se han utilizado de manera muy extensa como indicadores del estado hídrico de la planta, ya que indican de manera bastante fiable la respuesta de la planta al RD. Así mismo, los valores de potencial hídrico han sido utilizados como valores umbral para la programación de riegos en viña (Girona et al., 2006a) en melocotón (Girona et al. 2006b), en olivo (Doupis et al.2013) entre otros.

b) Crecimiento vegetativo y crecimiento del fruto

Es conocido desde hace tiempo que uno de los procesos más sensibles al déficit hídrico en los árboles es el crecimiento vegetativo. Se han observado disminuciones en el crecimiento de los brotes y en el diámetro del tronco en muchas especies, (Girona et al., 2005a, b; Intrigliolo y Castel, 2005; Marsal et al. 2008a; Pérez Pastor et al., 2009), entre ellas el olivo (Girona et al., 2001). Esta disminución del crecimiento conduce a árboles de tamaño más pequeño, de manera que incluso se ha propuesto este tipo de manejo del agua como una forma de reducir el vigor en plantaciones superintensivas (Rius, 2007).

La sensibilidad del crecimiento a ligeros déficits de agua es tan alta que, las pequeñas fluctuaciones que se producen en el diámetro del tronco, se han utilizado en muchos estudios como el indicador más fino del estado hídrico ya que es uno de los primeros indicadores fisiológicos que aparecen como respuesta del árbol, así se ha visto en limón (Ortuño et al., 2004) en melocotón (Conejero et al., 2007) y en otras especies (Fernández y Cuevas, 2010a).

La acumulación de agua en el fruto es también muy sensible al nivel de déficit hídrico que tenga el árbol durante la fase de desarrollo del fruto, mientras que la acumulación de materia seca no parece ser tan sensible (Girona et al., 2004). Cuando se aplican déficits moderados durante las primeras fases del crecimiento del fruto, el crecimiento de los mismos no parece verse disminuido en relación con el de árboles plenamente regados; es más, el crecimiento del

fruto parece verse estimulado en las fases subsiguientes en las que se riega con el 100% de la ETc como consecuencia de una mayor tasa de crecimiento en la que el fruto parece recuperar el tiempo perdido, como ha sido encontrado en albaricoque (Ruiz-Sánchez et al., 2000), en cítricos (González-Altozano y Castel, 2003).

Existe un acuerdo generalizado en que los déficits hídricos que se producen en las últimas fases del crecimiento del fruto (fase III en los frutos de crecimiento doble sigmoideal) producen una reducción del tamaño que afecta negativamente a la producción. Por ello, este momento es considerado crítico para el manejo de los riegos (González-Altozano y Castel, 2003, Torrecillas et al., 2000; Girona et al., 2004).

Desde este punto de vista, el RD puede ser una poderosa herramienta para manipular el crecimiento del árbol y obtener producciones “completas” con menos crecimiento vegetativo. Para ello separar con total claridad los principales momentos de crecimiento vegetativo y diferenciarlos de las fases de crecimiento del fruto es imprescindible para tener éxito en el manejo del riego. De esta manera, el déficit hídrico solo afectará a uno de los procesos en cada momento. Sin embargo, si los procesos de crecimiento vegetativo y del fruto se solapan será el primero el que se vea más afectado.

c) Rendimiento y calidad del fruto

El rendimiento final de un árbol frutal depende del riego y de las condiciones climáticas de la campaña, así como del comportamiento de la floración y el cuajado, que a su vez dependen de las condiciones del año anterior en el momento de la diferenciación de las yemas. En ocasiones, se ha detectado una menor densidad de flores y un peor cuajado del fruto como consecuencia de un RD el año anterior en algunos frutales como en pera (Marsal et al., 2002) en albaricoque (Ruiz Sánchez et al., 1999) y en melocotón (Girona et al., 2003).

Las prácticas de cultivo, incluyendo la poda, influyen en la carga final del árbol. Hay que tener en cuenta la combinación de el RD y carga: en general, cuando la carga es alta el crecimiento del fruto es mucho más sensible al déficit hídrico y puede llegar a no recuperarse en ocasiones (Marsal et al., 2008a).

En el caso del olivo los RD aplicados durante la fase de crecimientos del fruto parecen estar correlacionados con una maduración más temprana y una mayor coloración del Índice de Maduración, obteniéndose aceites más estables y frutados (Motilva et al., 2000; Girona et al., 2001).

Así pues el riego deficitario controlado (RDC) tiene un enfoque más fisiológico que el riego deficitario (RD) ya que contempla tanto la fenología del cultivo como su capacidad para resistir situaciones de déficit hídrico. En este sentido, estudios realizados sobre diferentes cultivos han demostrado que esta estrategia de riego puede maximizar la producción por unidad de agua aplicada (Domingo et al., 2005). Los mejores resultados se han obtenido en cultivos leñosos y hortícolas de gran valor comercial cuando son cultivados en climas áridos y semiáridos, (Pereira et al., 2002; Jones, 2004; Fereres y Soriano, 2007; Ruiz-Sánchez et al., 2010).

Muchos autores han constatado que el RDC mejora las características físicas y químicas del fruto en diferentes especies frutales como es el caso del albaricoquero (Pérez-Pastor et al., 2009a), limonero (Domingo et al., 1996), mandarino (González-Altozano y Castel, 1999), manzano (Ebel et al., 1993), melocotonero (Chalmers et al., 1981; Crisosto et al., 1994; Gelly et al., 2004), naranjo (Castel y Buj, 1990), olivo (Gómez-Rico et al., 2007; Iniesta et al., 2009) y vid (Dos Santos et al., 2007; Chalmers et al., 2008).

1.5 Respuesta del olivo al Riego Deficitario

El olivo es una de las plantas en las que las estrategias de RD han resultado muy útiles para la producción de aceitunas para aceite (Alegre et al. 2002; Moriana et al., 2003; Iniesta et al. 2009). Además, los anteriores autores han podido comprobar que la segunda fase del desarrollo del fruto (cuando se produce el endurecimiento del hueso) es la fase más resistente al déficit hídrico. En sus experiencias, redujeron (o incluso suspendieron) los aportes de riego desde el inicio del endurecimiento del hueso hasta dos semanas antes del inicio de la maduración de las aceitunas. El hecho de que este periodo (Julio-Agosto) coincida en nuestras latitudes con un periodo de alta demanda evaporativa hace que esta estrategia de riego sea muy interesante para este cultivo.

Por lo anterior, una de las estrategias más utilizadas es el Riego Deficitario Controlado (RDC) que se basa en reducir las aportaciones de agua en los momentos

en los que el cultivo es menos sensible al estrés hídrico (Moriana et al, 2003; Iniesta et al, 2009; Alegre et al, 2002). En el caso del olivo, este estrés inducido coincide con la fase de endurecimiento del hueso que se produce en los meses de verano.

En sus experiencias clásicas llevadas a cabo en Lérida, Alegre et al. (2002) estudiaron durante cuatro años la respuesta de olivos de la variedad Arbequina a un riego que satisfacía las necesidades del cultivo (100% ETc) y las compararon con las que encontraron en olivos a los que se aportaba el 25%, el 50% y el 75% ETc en los meses centrales del verano. Los resultados indicaron que el RD mejoró la productividad del agua, las características organolépticas del aceite y el comportamiento de los frutos en la fase de extracción de aceite. El tratamiento de riego del 50% de la ETc es particularmente interesante ya que consigue ahorros de agua del 35% sin pérdida de producción. En general, los tratamientos con RD aceleraron la maduración de los frutos y afectaron a la composición de aceite en las primeras fases de la maduración de la aceituna. Sin embargo, las diferencias en el momento de la cosecha fueron mínimas (Motilva et al., 2000).

En el mismo sentido, Moriana et al. (2003) compararon la respuesta de olivos de la variedad Picual regados con estrategias que denominaron de RDC y RDS con un control que se regaba con el 100% de la ETc estimada. El RDC consumía un 75% de la ETc, con un periodo de déficit en el verano en el que los árboles no recibían riego. El RDS también consumía el 75% de la ETc, pero el déficit se distribuía a lo largo de todo el periodo de riegos. Los resultados indicaron que las disminuciones de la producción de ambas estrategias de riego con respecto al control fueron similares. Aunque el estado hídrico de la planta era mejor en la estrategia de RDS, la diferencia no era suficiente para justificar una estrategia frente a la otra dado que los rendimientos fueron los mismos desde el punto de vista estadístico. Los autores encontraron también una relación curvilínea entre el rendimiento y la ETc, lo que significaba que la productividad del agua es muy alta a dosis bajas de aplicación de riego y que ambas estrategias de riego se pueden considerar apropiadas para el olivo. (Fereres y Soriano, 2007).

Los mismos tratamientos (control plenamente regado, RD y RDC) fueron testados por Iniesta et al. (2009) con olivos arbequinos en la provincia de Córdoba. Ambos tratamientos de RD recibieron la misma cantidad de agua en la campaña, alrededor del 25% de lo recibido por el control. Los resultados de tres años mostraron que los RD causaron un descenso de la ET (30-35%) y en la eficiencia del uso de la

radiación y condujeron a una reducción del rendimiento en aceite del 15%. La eficiencia en el uso del agua en RDS y RDC era mayor que la del tratamiento control, aunque no existían diferencias entre los tratamientos deficitarios. En consecuencia, concluyeron que ambas estrategias de riego deficitario pueden ser usadas en la programación de riegos del olivo ahorrando una cantidad significativa de agua sin descensos importantes en el rendimiento graso. Goldhamer (1999) encontró que una disminución del agua del 15-25% hacia mitades del verano no tenía incidencia en la cosecha.

Muchas experiencias han constatado una reducción en el crecimiento vegetativo inducido por el RD (Moriana et al., 2003; Iniesta et al. 2009). Este efecto, que puede tener un gran interés para la reducción del desarrollo de la copa del árbol con los consiguientes ahorros de prácticas culturales, puede reducir el nº de frutos y por tanto la producción.

El problema de estas estrategias es que la bibliografía no muestra datos concluyentes acerca de ahorro de agua que se puede conseguir y que el nivel y la duración del estrés es variable en cada campaña y no son tomados en consideración. Así, mientras Melgar et al. (2008) no encuentran respuestas ni vegetativas ni productivas a diferentes regímenes de riego, Grattan et al. (2006) obtienen justamente lo contrario.

1.6 La monitorización del riego. Control del estrés hídrico

El agua es el factor más limitante de la producción agrícola, en especial en las zonas mediterráneas como la nuestra. El papel del aporte hídrico al olivo como importante regulador de la cantidad y la calidad de la cosecha es ampliamente conocido (Orgaz y Fereres, 2001).

La creciente competencia por los escasos recursos hídricos disponibles exige cada día un mayor control en la eficiencia del uso del agua. Ello implica maximizar la productividad (producción de aceite por unidad de agua aplicada) para lo cual se deben adoptar medidas que minimicen las pérdidas del agua no utilizada por el cultivo (escorrentía, percolación y evaporación, fugas en las conducciones y canalizaciones, etc.). En este sentido, un buen diseño de la instalación es primordial para conseguir este objetivo.

Pero además de lo anterior hay que trabajar desde el punto de vista agronómico para regular las cantidades de agua que se aplican. Hay que adaptar las dosis y las frecuencias a las necesidades reales del cultivo en cada momento y, en ocasiones, moderar y disminuir el aporte por debajo de las necesidades en los periodos no críticos. Por fortuna, y como hemos mencionado anteriormente, el olivo es una de las especies que mejor se adapta a este último concepto de Riego Deficitario siempre y cuando evitemos el déficit hídrico en los periodos de mayor sensibilidad a la falta de agua.

La estimación de las necesidades hídricas de los cultivos se realiza, habitualmente, mediante balances hídricos en el suelo o mediante métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial basados en parámetros climáticos y coeficientes de cultivo, siendo la metodología FAO (Allen et al., 1998) la que se usa con más frecuencia. En la actualidad los distintos servicios de asesoramiento al regante disponen de redes de estaciones agroclimáticas en distintas localizaciones cuyos datos están a disposición de los usuarios de forma rápida, fiable y asequible, incluidos los datos de ET₀ diaria.

A pesar de estos esfuerzos, la estimación de la Evapotranspiración del cultivo todavía adolece de poca precisión como hemos visto. Por ello sigue siendo un tema de enorme interés el encontrar indicadores, basados en el suelo o en la planta o en una combinación de ambos, que nos aporten una información más precisa de la cantidad de agua que se incorpora al sistema suelo-planta en cada momento y permitan, por tanto, tomar mejores decisiones en la programación del riego, de forma que se eviten pérdidas en profundidad o, por el contrario, el déficit hídrico del árbol. (Fernández et al, 2010a).

Los indicadores del estado hídrico del suelo conllevan la dificultad de la gran anisotropía del medio, esto es, de la gran variabilidad natural edafológica que presentan nuestros suelos. Esta característica, en el caso del riego localizado, implica además una gran variabilidad en la distribución del agua en el perfil en el que se desarrollan las raíces. Si a esto añadimos que la mayoría de los instrumentos tienen su zona de influencia y medición muy limitada, tendremos una idea aproximada de lo complicado que resulta obtener una buena representatividad de los puntos de medida en relación a toda la parcela.

Los indicadores basados en la planta dan una información más real de su estado hídrico, puesto que las plantas actúan como integradoras del clima y del suelo. No obstante, la variabilidad de las plantas (aunque es menor que en el caso del suelo) también suele ser elevada por lo que los problemas de representatividad en la parcela son asimismo importantes (Fernández et al, 2010b).

1.6.1 Utilización de medidas basadas en el suelo

Contenido de agua en el suelo

El contenido de humedad del suelo se suele expresar en peso (humedad gravimétrica, g agua/g suelo) o más convenientemente en volumen (humedad volumétrica, m³ agua/m³ suelo). También podemos expresarlo como volumen de agua por unidad de superficie (m³ /hectárea, litros /m², mm) teniendo para ello en cuenta la profundidad que alcanza el agua con el riego.

Cuando hablamos de riego son de especial interés dos contenidos de humedad: la “Capacidad de campo” (CC) y el “Punto de Marchitamiento” (PM). La CC representa el contenido de agua de un suelo después de un riego o lluvia abundante cuando el drenaje ha cesado. Desde este punto de vista es un límite superior a la cantidad de agua a aportar por medio del riego. Por el contrario, el PM representa el contenido de agua del suelo, al cual las plantas no son capaces de extraer agua del mismo. Se define como el contenido de agua equivalente a un potencial de -15 bar.

La diferencia entre la CC y el PM ha recibido distintos nombres en la bibliografía (Agua Útil (AU), Agua Disponible (AD), Agua Total Disponible (ATD)) y representa el intervalo de humedades máximas y mínimas del suelo en el cual las plantas pueden extraer agua para sus necesidades fisiológicas. Sin embargo, y aunque el olivo está adaptado a condiciones secas, si nos movemos en las franjas de baja humedad cercanas al PM, las raíces tienen que hacer un enorme esfuerzo y gasto energético para absorber el agua del suelo. Por lo tanto, para el manejo del riego es conveniente definir un límite de agotamiento del agua útil del suelo a partir del cual ya se produce una reducción apreciable del funcionamiento normal de la planta. Orgaz et al. (2005) lo estiman en el 75% para plantaciones adultas y en el 50% para plantaciones jóvenes.

Estos límites han de definirse para la profundidad del suelo ocupado por el sistema radicular activo que en el caso del olivo superintensivo suele ocurrir en los

primeros 40-80 cm del terreno, dependiendo de la edad de los árboles, del tipo de suelo y del propio manejo del riego (Rius, 2007).

Medida del contenido de agua en el suelo por gravimetría

Es el método de referencia, pero se usa poco por ser lento y engorroso. Para ello se toma una muestra de suelo y se pesa. A continuación se deseca en una estufa y se vuelve a pesar. La diferencia entre las dos pesadas en relación al peso seco del suelo es el contenido de agua del suelo o humedad gravimétrica.

Medida del contenido de agua en el suelo por energía, tensión o potencial

Las plantas absorben agua del suelo, no en función del contenido, sino de la energía o potencial (ψ) con que el agua está retenida fundamentalmente por los coloides del suelo. Esta fuerza que debe vencer el sistema radicular para absorber el agua, es mayor cuanto menos agua hay en el suelo. En un suelo no saturado, es la suma de las fuerzas de adhesión y cohesión en la matriz porosa del suelo y por ello se la denomina tensión matricial (ψ_m) y del efecto de las sales (ψ_o), denominado potencial osmótico. En un suelo no saturado los valores del potencial son negativos (succión). Un valor más negativo indica un suelo más seco y una mayor dificultad para extraer el agua del suelo.

Uno de los instrumentos más utilizados para la determinación del potencial matricial del suelo son los denominados tensiómetros. Se compone de una cápsula cerámica porosa, permeable al agua y a los solutos, conectada a un vacuómetro mediante un tubo de plástico lleno de agua. Miden el potencial matricial y, por lo tanto, la disponibilidad de agua para las plantas.

Los tensiómetros miden rangos de humedad relativamente elevados, por lo que no son adecuados cuando lo que se pretende es manejar situaciones de estrés. Además, requieren un cierto mantenimiento (rellenar de agua) por lo que no son muy usados en olivicultura.

Medida del contenido de agua en el suelo por resistencia eléctrica

Los aparatos que utilizan estas características se basan en que la resistencia al paso de una corriente eléctrica en un medio poroso depende del contenido de humedad y de la concentración de sales, se utilizan para determinar indirectamente el potencial y el contenido de agua en el suelo.

Los normales utilizan una matriz de yeso en la que hay introducidos dos electrodos que conectados por cables a un aparato lector dan una medida de la resistencia eléctrica. Mediante las correspondientes ecuaciones de calibración transforman las señales eléctricas en el potencial o contenido de agua del suelo.

Los más modernos (Watermark®) emplean una matriz granular que no se disuelve tan fácilmente como el yeso, en su interior van los electrodos separados por una membrana y el conjunto se reviste exteriormente con una malla de acero inoxidable, por lo que son más duraderos.

Estos aparatos son baratos y fáciles de usar, pero tiene el inconveniente de que hay que calibrarlos para cada suelo. Miden mejor en rangos de humedades elevadas, por lo que no se usan mucho en riegos localizados de alta frecuencia.

Medida del contenido de agua en el suelo por sonda de neutrones

Se basa en una fuente radioactiva emisora de neutrones rápidos que se introducen en el suelo, en el cual por choque con átomos de igual masa, fundamentalmente hidrógeno del agua, pierden su energía y se convierten en neutrones lentos, que son contados por un detector. Tanto la fuente emisora como el detector de neutrones van instalados en una sonda cilíndrica que se introduce en el suelo a través de unos tubos de acceso previamente instalados en el suelo, permitiendo la lectura a las distintas profundidades deseadas.

Presentan la ventaja de que pueden leer a distancias relativamente elevadas y que son precisos. Su inconveniente deriva de la radioactividad que emiten, lo que hace que su uso esté muy regulado. Son además, aparatos caros. Se han usado en Australia para cultivos de olivo superintensivo (Rius, 2005).

Medida del contenido de agua en el suelo por sensores TDR

El suelo se comporta como un condensador eléctrico y tiene un coeficiente dieléctrico muy diferente de los sólidos y del aire. Este coeficiente varía fundamentalmente con la humedad y en menor medida con la salinidad y la temperatura. En suelos no salinos y a temperatura ambiente estos últimos efectos se suelen despreciar, por lo que la medida del coeficiente dieléctrico se considera proporcional a la humedad sin excesivos errores.

Los sensores TDR (del inglés Time Domain Reflectometry) o Reflectometría en el Dominio del Tiempo miden el coeficiente dieléctrico a partir del tiempo que le cuesta recorrer a un impulso electromagnético la distancia que existe entre dos varillas que introducimos en el suelo y que sirven de guía a las ondas.

Son muy precisos y funcionan bien en un amplio rango de humedad. El problema radica en que las varillas no son capaces de realizar las medidas a profundidades elevadas, por lo que su utilización en plantaciones arbóreas está limitada a los primeros centímetros del terreno. Son además aparatos caros.

Medida del contenido de agua en el suelo por sensores FDR

Su nombre proviene de las siglas en inglés Frequency Domain Reflectometry o Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia.

De funcionamiento parecido a los anteriores, se basan en la medida del coeficiente dieléctrico a través de la frecuencia con la que oscilan unos sensores que depende de la capacitancia, que a su vez depende de la humedad del suelo. Existen sondas simples y sondas multisensor cuyo diseño más habitual es el de anillos concéntricos que se colocan a distintas profundidades del suelo. En este caso, la instalación del tubo de acceso debe ser muy cuidadosa para evitar que existan huecos de aire que darían lecturas falsas. Así mismo la presencia de elementos gruesos en el suelo dificulta la instalación del tubo de acceso, por lo que en suelos con alto contenido de elementos gruesos no son aconsejables.



Fot. 4. Sonda FDR en el momento de su instalación

Este problema es común para todos aquellos aparatos que necesitan tubos de acceso como la sonda de neutrones, el TDR, etc.

Los sensores FDR son aparatos resistentes, estables y de lectura rápida. No necesitan mantenimiento pero su precio de adquisición es elevado y su instalación en el campo ha de realizarse con sumo cuidado.

También existen sondas FDR portátiles en las cuales el sensor se introduce manualmente a lo largo del tubo de acceso. De forma que se pueden tener distintos tubos de medición distribuidos en una parcela y con una única sonda hacer numerosas medidas de humedad en distintos puntos. En este sentido las medidas serán discontinuas pero servirán para complementar las medidas continuas de un punto fijo.



Fot. 5. Sonda FDR para mediciones puntuales a través de un tubo de acceso.

Todos los aparatos descritos, a excepción de los tensiómetros y la sonda de neutrones, dan una señal eléctrica y por tanto sus datos pueden ser almacenados a intervalos regulares de una forma automática mediante registradores de datos; posteriormente estos se descargan a sistemas informáticos para su estudio e interpretación.

La elección de uno u otro sistema dependerá de lo que se quiera medir, y del rango de humedad en que queramos trabajar. En este sentido, el FDR el que mayor rango de humedad puede abarcar en sus determinaciones de una forma fiable, y por lo tanto se adapta bien a cualquier situación de estudio, de forma que se puede trabajar en suelo saturado en riego localizados de alta frecuencia y en suelos sometidos a estrés hídrico. Su precisión es lo suficientemente buena ($< 1\%$) y la repetibilidad es asimismo del 1%.

1.6.2 Utilización de medidas basadas en la planta

Medida de aspecto y crecimiento de los brotes y frutos

La falta de agua provoca numerosos cambios en el aspecto y crecimiento de los brotes de los olivos y de las aceitunas, tales como el cambio de color en las hojas más distales que se vuelven plomizas, disminución de la longitud de los brotes, decaimiento de las hojas y, en casos extremos, arrugamiento de los frutos. Sin embargo, estas indicaciones no son fáciles de cuantificar y no permiten sacar conclusiones de unas situaciones a otras.

Medida del potencial de agua en la planta

Es uno de los parámetros más utilizados para la medida del estado hídrico de la planta, y representa la medida de la energía del agua retenida por la hoja. Ha sido ampliamente utilizado para la programación de riegos y representa todavía uno de los mejores métodos de referencia.

Al mediodía, los valores del Potencial hídrico (Ψ) pueden ser muy negativos, incluso en árboles bien regados, si la demanda atmosférica es alta (Fernández et al., 1993; Fernández et al., 1997). Bongi y Palliotti (1994) mencionaron que la amplia caída del Ψ al mediodía en los árboles bien regados podría reflejar una fuerte resistencia al movimiento del agua. Señalaron que es difícil establecer un Ψ crítico para el crecimiento o procesos fisiológicos, y se refiere a un artículo de Rhizopoulos et al., (1991), en el que se informa que las hojas de olivo pueden tolerar valores de Ψ cerca de -9 ó -10 MPa manteniendo la turgencia y el contenido de agua de las hojas. Después de alcanzar un valor mínimo durante las horas centrales del día, Ψ llega a ser menos negativo por la tarde y su valor en las horas posteriores a la puesta del sol, indica el grado de recuperación del estrés hídrico.

Los trabajos de Chaves (1991) y Cornic y Massacci, (1996) muestran que las plantas sometidas a déficit hídrico presentaron menores Ψ_{md} que los controles bien regados. El potencial hídrico mostró una gran disminución en plantas estresadas y por lo tanto, parece ser la primera respuesta del olivo para evitar su deshidratación.

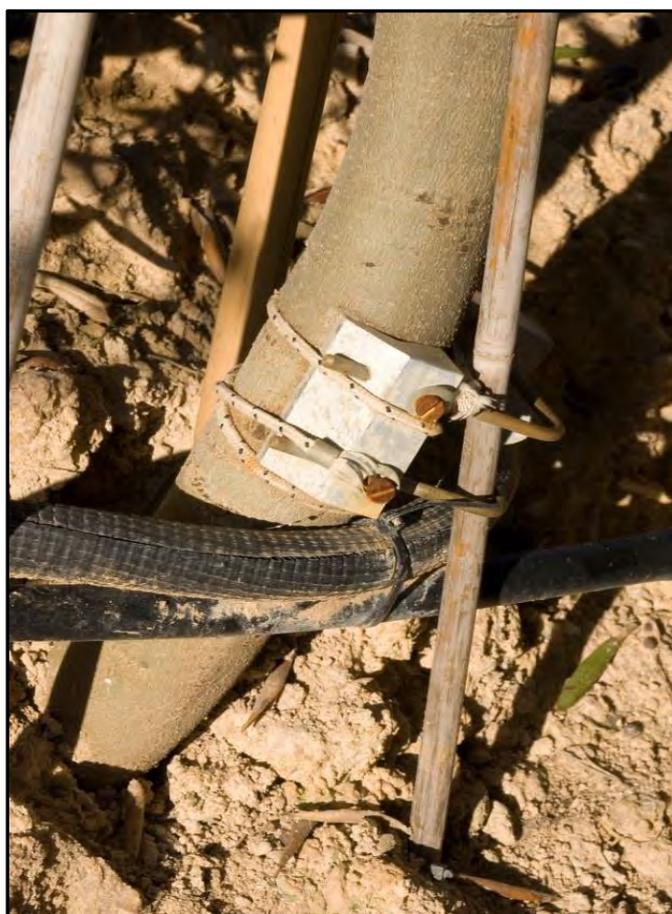
Moriana y Fereres (2004) consiguieron establecer relaciones entre los valores de potencial hídrico del tallo y las variaciones del diámetro de los troncos en árboles jóvenes de 3 años y en árboles adultos de 18 años, todos ellos bien regados.

Concluyeron que eran relaciones de histéresis y propusieron las fórmulas que los relacionaban.

Medida de las contracciones del tronco

En el intento de desarrollar automatismos que permitan eludir las mediciones obtenidas por la cámara de presión, se han buscado instrumentos de medida que pudiesen tener una salida eléctrica.

Uno de los que mayor éxito ha tenido son los dendrómetros (Fot. 6), que miden la variación del diámetro del tronco (o del fruto) con una precisión muy elevada (10 micras) mediante sensores LVDT (del inglés Linear Variable Differential Transformer) o sensores de desplazamiento lineal, que se “abrazan” al tronco y miden sus variaciones de diámetro en continuo (Fernández et al., 2010).



Fot. 6. Dendrómetro instalado en el tronco de un olivo adulto.

Las variaciones del diámetro del tronco pueden ser una buena medida del estado hídrico del árbol. Cuando la transpiración comienza, por la mañana, se crea

una tensión en el xilema desde la superficie evaporativa (hoja) hacia el resto de los órganos de la planta. Parte del agua almacenada en los tejidos durante la noche se pierde para que la planta responda de manera rápida a los cambios producidos por la demanda evaporativa de estos momentos sin necesidad de que las raíces comiencen a funcionar (lo hacen más tarde). Este fenómeno ocurre en todos los órganos de la planta, de modo que los cambios de diámetro se han observado en el tronco, ramas, brotes, raíces, hojas y frutos (Fernández y Cuevas, 2010). En los árboles, al agua almacenada en los troncos (en el cambium, en el floema, en el tejido vivo de la corteza) puede contribuir sustancialmente a esta Evaporación de forma que sale de los tejidos y se pierde, con la consecuencia de que el diámetro del tronco decrece.

La limitación de los métodos que se basan en la medida de la variación del diámetro del tronco radica en que este último no depende sólo del estado hídrico, sino también de otros parámetros como son: la edad el árbol y su tamaño (Intrigliolo y Castel, 2006), características de crecimiento estacionales (Ortuño et al, 2004), la carga del árbol (Moriana y Fereres, 2004). Esto hace que la interpretación de los valores obtenidos por la dendrometría sea complicada y requiera una cierta experiencia. Además, especies como la viña y el olivo tienen sus propias peculiaridades, lo que puede estar detrás de algunos de los pobres resultados que se han obtenido aplicando esta técnica (Intrigliolo y Castel, 2007).

Medidas de las contracciones diarias

Los trabajos de Herzog et al. (1995) muestran la dinámica diaria del crecimiento del tronco en olivos adultos ligado al flujo de savia. Ellos encuentran que hay 5 fases diferentes como se muestra en la Figura 2. La Fase I describe la rehidratación del tronco (y de toda la planta) durante la noche como consecuencia de la absorción de agua por las raíces. El flujo de savia es, en estos momentos, mínimo. Los tejidos almacenan agua y, como consecuencia, el diámetro del tronco crece. Este crecimiento se ralentiza justo después del amanecer (Fase II). La Fase III muestra como el flujo de savia va creciendo hasta alcanzar su máximo diario mientras el diámetro del tronco decrece rápidamente para regular la demanda evaporativa. La Fase IV muestra como al anochecer la tendencia se invierte y la pérdida de agua disminuye progresivamente y la fase V (que ocurre durante la noche) vuelve a mostrar un mínimo del flujo de savia y un crecimiento del tronco por rehidratación de los tejidos.

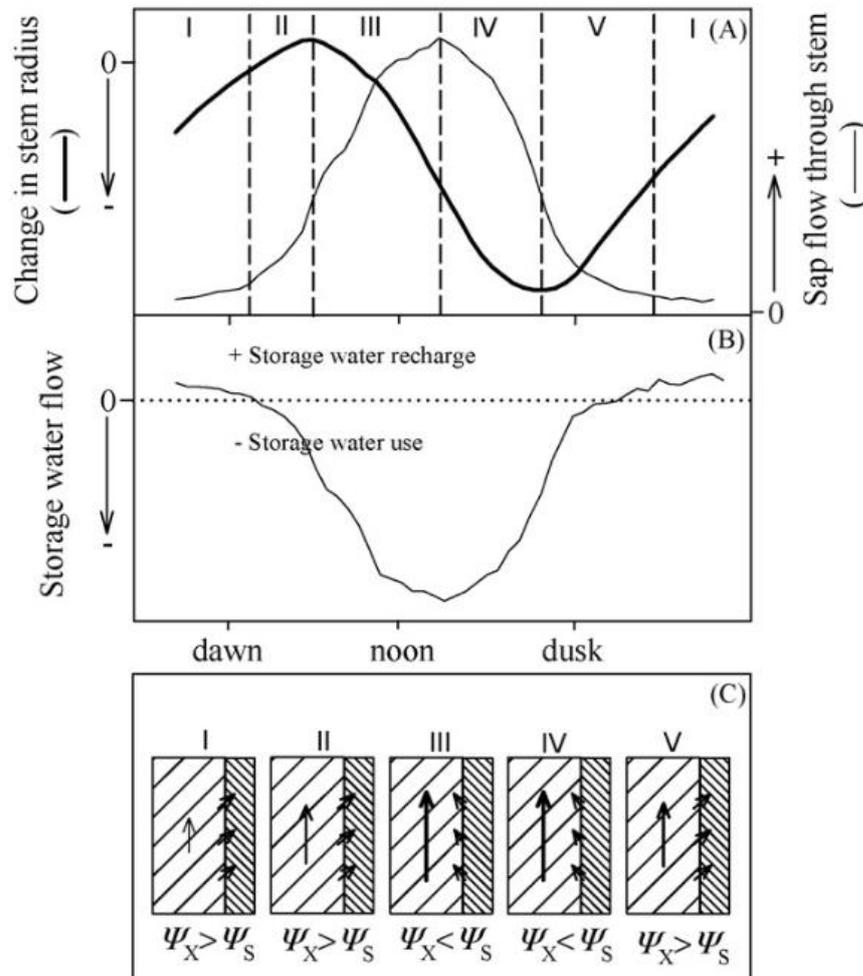


Figura 2. Crecimiento del tronco de un olivo de 37 años. (Fernández y Cuevas, 2010).

La figura muestra la evolución del crecimiento del tronco en un árbol de olivo de 37 años de edad y su comparación con el flujo de savia con las 5 fases descritas (tomado de Fernández y Cuevas, 2010). En la parte central el flujo teórico idealizado del agua almacenada en los tejidos. Por último, en la parte de abajo muestra el flujo de savia en el tallo y el intercambio de agua entre el xilema y los tejidos que almacenan agua para las cinco fases, así como las correspondientes variaciones en el potencial hídrico del xilema (ψ_X) respecto a los tejidos de almacenamiento (ψ_S).

El potencial que tiene las medidas de la variación del diámetro del tronco se basan en el hecho de que las variaciones debidas a las contracciones y dilataciones por los cambios de contenido de humedad en el árbol son sensiblemente mayores de los que se esperarían por el crecimiento de la planta (Simonneau et al. 1993) o por variaciones debidas a cambios en la temperatura.

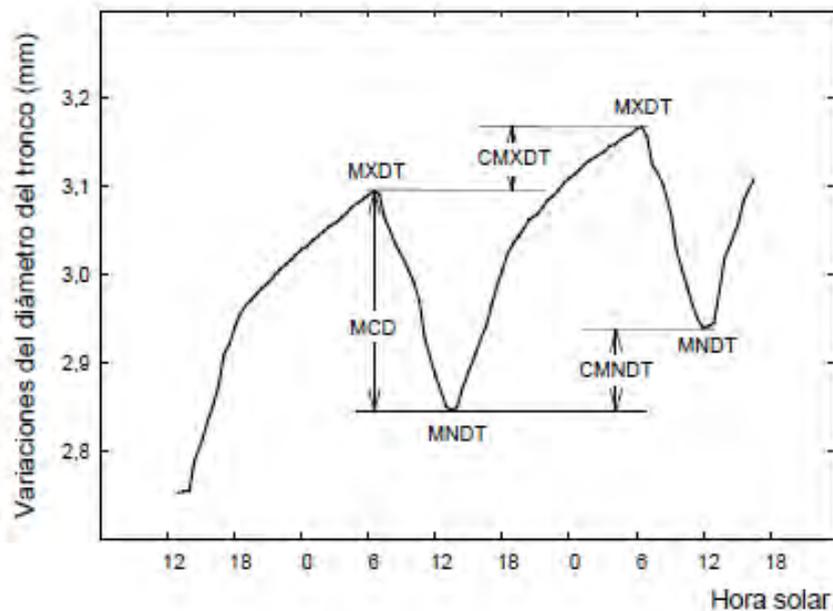


Figura 3. Parámetros derivados de las fluctuaciones del diámetro del tronco en dos días consecutivos (Goldhamer y Fereres, 2001).

Las variaciones del diámetro de los troncos, se pueden expresar según los índices propuestos por Kozlowski (1967), citado por Ginestar et al. (1995) y representados en la Figura 3.

- 1) Diámetro máximo observado durante el día (MAXDT). El crecimiento diario (TCD o CMXDT) vendría expresado como la diferencia entre los máximos observados en días consecutivos. El crecimiento medio a más largo plazo puede obtenerse por el análisis de la pendiente del MAXDT frente al tiempo.
- 2) Diámetro mínimo observado durante el día (MNDT). La variación del diámetro mínimo del día también nos da una medida de la tasa de crecimiento del tronco y puede ser una de los primeros signos de estrés hídrico (Goldhamer et al., 1999).
- 3) Amplitud de las oscilaciones o máxima contracción diaria (MCD), diferencia entre el diámetro máximo registrado por la mañana y el diámetro mínimo (MNDT) registrado al atardecer. Esta variación de diámetro representa el aporte de agua del floema a la transpiración (Moltz y Klepper, 1972).

El MNTD refleja el efecto combinado del suministro de agua desde el suelo y la demanda evaporativa sobre la máxima contracción, mientras que el MXDT resulta afectado por los procesos de rehidratación, los cuales dependen esencialmente del suministro de agua desde el suelo y solo de manera indirecta de la demanda evaporativa del día precedente (Goldhamer y Fereres, 2001; Ortuño et al. 2004a).

Tanto la magnitud de MCD como la tasa de crecimiento diario del tronco (TCD), diferencia de valores MXTD entre dos días consecutivos (Figura 3), representan una información valiosa sobre la intensidad del estrés hídrico alcanzado (Egea, 2008). El interés de utilizar uno u otro va a estar determinado, en gran medida, por las tasas de crecimiento del árbol. Así, en plantaciones adultas con bajas tasas de crecimiento se desaconseja el uso de TCD; en cambio, en plantaciones jóvenes, donde el objetivo es maximizar su crecimiento de cara a una pronta entrada en producción, ocurre lo contrario (Moriana y Fereres, 2002; Domingo et al., 2005).

Medidas de las contracciones estacionales

A lo largo de la campaña podemos diferenciar tres modelos en cuanto a la variación del diámetro del tronco (Lassoie, 1979):

- En condiciones de baja demanda evaporativa y alta disponibilidad de agua en el suelo, el diámetro del tronco aumenta de una mañana a la siguiente mientras que durante el día no se producen decrecimientos y apenas se ven ligeras modificaciones en el diámetro. Esta fase corresponde con crecimiento activo del árbol.
- En condiciones de alta demanda evaporativa y alta disponibilidad de agua en el suelo también se produce el fenómeno descrito: el diámetro del tronco aumenta de una mañana a la siguiente. Pero en este caso, durante el día se pueden apreciar descensos considerables del diámetro, por lo que se podría caracterizar a este periodo como de una mezcla de crecimiento y rehidratación de los tejidos.
- Por último, en condiciones de alta demanda evaporativa y escasa disponibilidad de agua en el suelo hay una reducción neta del diámetro del tronco con una recuperación solo parcial durante la noche.



Fot. 7. Instalación de un dendrómetro en un olivo joven

Medida del flujo de savia

Otro indicador del estado hídrico de la planta al que se le está dedicando especial atención en estos últimos años y que está asociado a la absorción de agua por la planta es la medida del flujo de savia. Como en el caso anterior, los avances en la electrónica y en la transmisión de datos han permitido que, bien calibrados, puedan ser útiles en programación de riegos tanto de árboles frutales como en forestales (Cohen, 1991; Domingo et al., 1999; Alarcón et al., 2000; Fernández et al, 2010). El flujo de savia equivale a la transpiración en condiciones estacionarias y puede representar alrededor del 85% de la evapotranspiración en condiciones no limitantes de agua.

La técnica se basa en seguir la velocidad de desplazamiento de un pulso de calor emitido por una fuente térmica introducida en el recorrido de la savia. El tiempo transcurrido entre la emisión del pulso de calor y la recepción de éste por un sensor dispuesto aguas abajo permite calcular el tiempo invertido por la savia en recorrer esa distancia. Para distinguir entre el efecto de convección por movimiento de la savia y el transporte de calor por conducción térmica, se colocan asimétricamente un sensor aguas abajo y otro aguas arriba del calentador.

El equipo de medida registra los tiempos en los que se igualan las temperaturas de los termopares situados aguas arriba y abajo del calentador. Con estos valores y las distancias de instalación de los termopares al calentador se estima la velocidad del pulso de calor en cada profundidad. La conversión de velocidad del pulso de calor a flujo de savia total requiere de la estima de las propiedades físicas de la matriz leñosa y de la superficie de madera conductora (Fernández et al, 2010). Si se dispone de un control bien regado será posible determinar en qué momento se reduce la transpiración respecto a su valor máximo.



Fot. 8. Instalación de sensor para la medida del flujo de savia

Aunque la técnica de medida de flujo de savia por compensación de pulso de calor posee una base teórica sólida y son muchos los trabajos que manifiestan su sensibilidad al consumo de agua por la planta y su interés como indicador del estado hídrico de la planta, presenta actualmente algunos inconvenientes de cara a su utilización en la programación automática del riego. Entre ellos se pueden citar:

- a) Solo se puede utilizar en árboles a partir de diámetros de tronco de 6-8 cm.
- b) Su laboriosa y precisa instalación.
- c) - La pérdida de sensibilidad de las medidas con el tiempo, lo que obliga a un seguimiento permanente e instalación de nuevas sondas.
- d) - La escasa precisión en condiciones de bajo flujo, horas nocturnas.
- e) - La alta variabilidad encontrada.

- f) - La ausencia de valores umbrales para su uso.

Aunque miden procesos fisiológicos diferentes, Fernández et al., (2010) han encontrado relaciones entre las medidas obtenidas de la variación de diámetro de los troncos por dendrometría y las obtenidas de la medida del flujo de savia que resultan de mucho interés para el futuro

1.7 Experiencias de riego en olivo utilizando dendrometría

Por otra parte es cada vez más frecuente la utilización de medidas continuas del estado hídrico del suelo y de la planta junto a los datos climatológicos para la programación de los riegos (Ruiz-Sánchez et al, 2010; Ortuño et al., 2010). La disminución de precios de los equipos que permiten estas medidas, así como la creciente facilidad para la obtención y procesamiento de los datos, han permitido avanzar en el conocimiento de la respuesta de la planta ante variaciones del clima o del estado de humedad del suelo. Esta respuesta de la planta es frecuentemente medida con dendrómetros, que miden la variación del diámetro del tronco (Michelakis, 1997). Los valores asociados a estas medidas de la Máxima Contracción Diaria (MCD) y del Crecimiento Diario (CD) se han estudiado como una medida indirecta del estado hídrico del olivo (Moriana y Fereres, 2002; Moriana et al, 2003).

Michelakis (1997) realizó las primeras experiencias utilizando las variaciones del diámetro del tronco para la programación de los riegos de una plantación de olivos de 18 años colocados sobre un lisímetro y midiendo la máxima contracción diaria (MCD) y el Crecimiento Diario (CD). Encontró que la influencia del estado hídrico del suelo era mayor en el CD que en la MCD.

Moriana y Fereres (2002) observaron que el diámetro del tronco respondía antes que el potencial hídrico del tallo, que la tasa de asimilación de CO₂ neta y que la conductancia estomática a una reducción en las dosis de riego en una plantación de árboles jóvenes. De manera que concluyeron que el CD podía ser un índice adecuado para la programación de riegos cultivados bajo condiciones superintensivas de cultivo. Sin embargo, en sus experiencias, la MCD no parecía responder de la misma manera a los déficits hídricos. La explicación dada por los autores es que las tasas de crecimiento del tronco en los árboles jóvenes son muy elevadas y desplazaban hacia arriba tanto el máximo del diámetro del tronco como el mínimo del diámetro del tronco, de manera que la MCD de los árboles sometidos a déficit era similar a la MCD de los

árboles control. Por ello sugirieron que los árboles jóvenes deberían ser tratados de una manera diferente a lo árboles adultos si se van a usar estas técnicas para su programación de riegos.

Una experiencia de Moriana et al. (2003) realizada en árboles de 18 años de la variedad *Picual* permite observar la influencia del grado de estrés. Cuando trabajaban con relaciones entre la MCD y el potencial hídrico del tallo medido al mediodía (ψ_{tallo}) pudieron comprobar que existe una relación lineal entre ambos parámetros. Para valores de ψ_{tallo} de hasta -1,5 MPa, cuanto más negativo es ψ_{tallo} la MCD aumenta. Para valores más negativos del potencial hídrico, por el contrario MCD decrece. Los autores sugieren que la reducción de la MCD podría estar producida por la disminución en la transpiración debida al cierre de los estomas que se produce ante situaciones de estrés severo. A pesar de que el olivo no existe una relación clara entre MDC y ψ_{tallo} ambos parámetros siguen modelos similares de respuesta en estas condiciones.

Pérez-López et al. (2008) estudiaron el comportamiento estacional del Crecimiento Diario (CD) durante dos años en olivos de 5-6 años de la variedad "Cornicabra". Desde el inicio de la sesión de riegos (día 100 del año) hasta finales de mayo (día 150 del año) observaron un incremento lineal del CD; después, una fase más o menos constante hasta el día 180 a partir de la cual decrece hasta el día 205. A partir de este momento se estabiliza y permanece constante de nuevo.

Además, esta fase de crecimiento lineal del inicio del ciclo estaba relacionada con la temperatura, aunque advirtieron que la pendiente podría estar relacionada con la edad del árbol. En la segunda fase, el CD no estaba relacionado con la temperatura y sí con la mayor o menor presencia de frutos. De hecho, la fase de decrecimiento observada a partir del día 180 coincide en el tiempo con la fecha de la máxima expansión del endocarpo.

Nuestra hipótesis es que los índices derivados de las variaciones del diámetro del tronco en olivos adultos son los suficientemente sensibles para detectar estrés hídricos de plantaciones manejadas con RDC aunque ese sea severo, siempre y cuando el citado estrés permanezca por debajo del umbral en el cual las aceitunas se arrugan, ya que esta situación afecta directamente a la calidad y extractabilidad del aceite (Girona, 2007; Cuevas, 2010)

1.8 Objetivos

Este trabajo se ha propuesto como objetivo general estudiar distintas estrategias de riego para ahorrar agua en la variedad Arbequina en La Rioja, en cultivo superintensivo o en emparrado y adaptarlas a disponibilidades de agua limitadas.

Para la consecución de este objetivo se han planteado los siguientes objetivos parciales:

1. Comparar el efecto sobre la vegetación y sobre la producción de diferentes estrategias de Riego Deficitario (RD) *a lo largo de toda la campaña* y Riego Deficitario Controlado (RDC) *en la fase de parada vegetativa estival*. Los RDC han sido, además, separados en dos estrategias distintas: la que supone un estrés moderado (RDCEM) y la que supone un estrés severo (RDCES).
2. Comparar las estrategias anteriores con un método que se propone para regar durante los meses del verano midiendo la variación diaria del diámetro del tronco por dendrometría. Puesto que parece que el Crecimiento Diario (CD) del tronco es un indicador temprano del nivel de estrés alcanzado por el árbol se propone un método para regar sólo en los momentos en los que el árbol pueda sufrir estrés y se usa el $CD < 0$ durante dos días consecutivos como indicador para regar.
3. Comparar las estrategias anteriores con un riego "clásico" en que la totalidad de la demanda hídrica pueda verse satisfecha (Control), que se ha tomado como referencia.
4. Determinar la productividad del agua según los distintos métodos de riego estudiados.
5. Comprobar la influencia de las distintas estrategias de riego propuestas en la calidad del aceite obtenido.

Materiales y Métodos

2 Materiales y Métodos

2.1 Descripción de la parcela y diseño experimental

La experiencia se llevó a cabo a lo largo de 3 campañas y se inició en 2006 en una finca comercial situada en Quel (La Rioja) (42° 14'57.73" N; 2° 2'58.45" W) con árboles de 4 años de edad regados con riego localizado de alta frecuencia.

El clima en la zona es típicamente mediterráneo. Los datos climáticos se obtuvieron a través de una estación meteorológica del SIAR de La Rioja (Tabla 1), situada en la población de Autol, a escasos kilómetros de la finca experimental. Así mismo, en la propia finca, se contaba con una estación climática básica con registro de pluviometría, Tª a dos metros de altura y velocidad y dirección del viento.

Tabla 1. Evapotranspiración de referencia mensual (ET0) y pluviometría mensual acumulada (P) en los tres años de la experiencia (Año 2006, 2007 y 2008) según los datos obtenidos de la estación meteorológica de Autol.

Año	2006		2007		2008	
	ET0 (mm)	P (mm)	ET0 (mm)	P (mm)	ET0 (mm)	P (mm)
Enero	22,7	28,1	24	14,2	25,9	9,6
Febrero	42,6	43,4	38,2	36,8	33,8	14,9
Marzo	73,6	18,6	66,1	80,2	73,6	39,4
Abril	100,9	45,8	89,1	85,7	112,5	30,7
Mayo	137,6	42,1	123	62,2	104,8	130
Junio	165,4	87,2	140,5	20	137,5	79,3
Julio	175,1	29,7	176,4	1	163,9	21,9
Agosto	153,6	9,9	149,2	9,1	149,8	2,4
Septiembre	95,6	60,5	109,1	21,1	100,9	13,8
Octubre	66,6	12,5	62,8	48,5	54,9	39,8
Noviembre	31,5	33,4	46	7,1	33,2	91,9
Diciembre	19,2	5,8	20,3	39,3	21	55,6
Total año	1084,4	417	1044,7	425,2	1011,8	529,3

La temperatura media en esta zona fue de 13,8 °C, 13,0 y 13,7°C en los años 2006 a 2008 y la ET₀ fue de 1084 (2006), 1047 (2007) y 991 mm (2008). Las precipitaciones de los 3 años fueron de 417, 426 y 560 mm respectivamente y ocurrieron mayoritariamente fuera de los meses de verano.

En el momento del inicio del ensayo, en marzo de 2006 se efectuó una calicata en la parcela experimental comprobándose que el suelo era profundo (> 1,5 m) y se extrajeron muestras a los 30 cm y a los 60 cm que fueron llevadas al laboratorio para su análisis químico y físico. Los resultados de los parámetros químicos se muestran en las Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2. Análisis de suelo de la parcela experimental a dos profundidades. Año 2006

Profundidad	pH	CE (mS/cm)	P(ppm)	K (meq/100g)	M.O. (%)	Ca activa (%)	CO ₃ Ca (%)
30 cm	7,90	0,75	114	0,72	1,3	9,3	17,8
60 cm	8,18	1,6	82	0,40	0,7	9,4	ND
Valores de referencia	7,00	<1,2	20-50	0,50-0,80	2,0-3,0	1,5-5,0	15,0-20,0

Tabla 3. Análisis de micronutrientes en suelo de la parcela experimental a dos profundidades. Año 2006

Profundidad	Mg(1)	Ca(1)	Na(1)	Ca/Mg	Fe(2)	Cu(2)	Zn(2)	Mn(2)
30 cm	3,21	92,40	2,40	28,76	4,16	1,67	0,77	1,34
60 cm	1,43	135,33	0,81	94,34	1,53	1,48	0,16	0,94
Ref.	2,0-3,0	50,0-70,0	0,75-1,50	30-100	5,0-8,0	1,50-2,0	1,0-3,0	2,0-4,0

(1) Meq/100 g

(2) ppm

Los resultados para los análisis granulométricos y su interpretación desde el punto de vista del riego (Saxton et al, 1986) se muestran en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4. Análisis de granulometría del suelo (USDA) de la parcela experimental y clasificación del suelo a 30 y 60 cm. a tres profundidades. Año 2006.

Profundidad	Arena(%)	Limo(%)	Arcilla(%)	Clasificación (USDA)	Conductividad hidráulica (cm/h)	
30 cm	19,78	72,93	7,29	Franco-limoso	3,9	Alta
60 cm	22,82	64,76	12,42	Franco-limoso	1,6	Alta

A partir de los datos de granulometría se calcularon la humedad a capacidad de campo, el punto de marchitamiento y densidad aparente del suelo, mediante las

fórmulas propuestas por Saxton et al. (1986) y desarrolladas en el programa SoilPropertiesCalculator (www.pedosphere.com/resources/.../triangle_us.cfm).

El porcentaje de agua útil en el suelo se tomó como la diferencia del porcentaje de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento y a las dos profundidades, según se refleja en la tabla 4.

Tabla 5. Porcentaje de agua en el suelo a dos profundidades (30 y 60 cm). Año 2006.

Profundidad	CC(%)	PM(%)	Da	Sat	AU (%)
30	29	9	1,52	43	20
60	28	10	1,44	46	18

CC = Capacidad de Campo (%); PM = Punto de Marchitez permanente (%); Da = Densidad aparente (g/cm³); Sat = saturación (cm³ agua/cm³ suelo); AU = agua útil (%)

Se tomó como valor de agua útil del suelo la media entre las dos profundidades siendo esta del 19 %.

Así mismo se tomó el valor medio de la densidad aparente de las dos profundidades del suelo, 1,48 g/cm³, para el cálculo del contenido de AU del perfil de suelo explorado por las raíces, que como se observa en la Fot. 9 alcanzaba los 0,6 m de profundidad, por tanto el Agua útil del suelo era:

$$AU = 1\text{m}^2 \cdot 0,6\text{ m} \cdot 1,480\text{ kg/m}^3 \cdot 0,19 = 168\text{ l}$$



Fot. 9. Calicata en la zona de ensayo

Teniendo en cuenta que el marco de plantación era de 4 m x 1,5 m, y que la sectorización para el riego de la finca solo permitía riegos diarios máximos de 4,5 h por sector, con el fin de poder aplicar un riego diario a toda la superficie, se consideró que la instalación estaba bien diseñada, ya que era capaz de dotar la suficiente agua para el mes de máxima demanda puesto que :

Maximas necesidades (Julio) = 4,2 mm/día x 4 m x 1,5 m = 25,2 l/árbol,día

Intervalo entre riegos : 1 día

Dosis de riego = 2,5 goteros/árbol x 2,5 l/h = 6,25 l/árbol.h

$$\text{Duracion del riego} = \frac{25,2 \frac{l}{\text{árbol}}, \text{día}}{6,25 \frac{l}{\text{árbol}}, h} = 3,84 h$$

La apertura de la calicata permitió comprobar las dimensiones del bulbo húmedo que eran de 0,75 cm de profundidad y un radio de 0,60 m cuando el tiempo de riego era de 4,5 horas, con goteros de 2,5 l/h (Fot. 10).



Fot. 10 . Bulbo húmedo desarrollado por los goteros de riego en las parcelas de ensayo.

Aunque la finca se suministra de agua de un embalse de la propiedad, el volumen no está garantizado puesto que el agua de riego procede de un cauce no regulado. Por ello, en marzo y septiembre de 2006 se tomaron dos muestras de agua a la entrada del embalse y se analizaron los principales parámetros que podían afectar al manejo del riego, con el fin de ver su evolución estacional.

En la Tabla 6 se muestran las características medias del agua de riego utilizada en los ensayos de riego.

Tabla 6. Análisis de agua de riego de la parcela de ensayo. Año 2006.

Determinación	27/03/2006	13/09/2006	Valores Normales (FAO)
pH	7,9	8,11	6 - 8,5
CE (mS/cm)	1,033	1,1	0 - 3
NO ₃ (meq/l)	0,04	<0,16	0 - 0,16
SO ₄ (meq/l)	5,31	5,61	0 - 20
HCO ₃ (meq/l)	0,1	1,73	0 a 10
Cl (meq/l)	3,2	3,3	0 a 30
Ca ⁺⁺ (meq/l)	5,3	5,5	0 a 20
Mg ⁺⁺ (meq/l)	1,17	1,64	0 a 5
Na ⁺ (meq/l)	4,09	5,06	0 a 40
K ⁺ (meq/l)	0,05	0,06	0 a 0,05
CTS (g/l)	0,66	0,70	0 a 1
SAR	2,27	2,68	0 a 15
Riveside	C3-S1	C3-S1	

Estudiando los análisis podemos concluir que son aguas de calidad normal, pero con riesgo de salinización. Se pueden utilizar para el riego en suelos de buen drenaje y con cultivos tolerantes. El agua es de bajo contenido en sodio.

La finca, y por lo tanto las parcelas experimentales que se encuentran dentro de ella, se plantaron el año 2002 con plantones de un año de la variedad arbequina clon i-18. El sistema de plantación se hizo por medio de plantadoras guiadas por láser, con una separación entre filas de 4 m y 1,5 m entre árboles, lo que supone una densidad de plantación de 1.666 árboles/Ha.

Los árboles individualmente tienen un vigor moderado, por lo que requieren de un sistema de tutores apoyados en alambres. La conducción se realizó en un eje central en el cual el árbol joven se iba atando al tutor de bambú a medida que se producía el crecimiento. Este sistema de plantación permite una rápida entrada en producción, de manera que en el año 2006 en el que se comenzaron los ensayos se consideró el primer año de plena producción (Matéu, 2007).

La fertilización de finca y de la parcela experimental se realizó por fertirrigación, es decir, se aportaban los distintos abonos a través del agua de riego. El reparto se realizaba por medio de una bomba inyectora a la salida de la bomba en la tubería de impulsión. Las cantidades globales de UF aportadas se muestran en la Tabla 7, aunque hay que señalar que dependiendo del estado fenológico del olivo se podía aportar proporcionalmente más UF de nitrógeno (al inicio del ciclo) o de potasio (al final del ciclo).

Tabla 7. Fertilización aplicada en la finca durante los años de ensayo.

Año	Unidades Fertilizantes Aplicadas por Ha		
	N	P2O5	K2O
2006	104	34	112
2007	92	28	104
2008	89	23	95

El mantenimiento del suelo se efectuó por medio de siegas en la calle y aplicación de herbicidas en la línea de cultivo (Glifosato + Oxifluorfen), ocupando una anchura de 0,50 m por cada lado de las filas de árboles.

Durante la experimentación el manejo del cultivo en lo referente a la poda y a los tratamientos fitosanitarios se realizó de acuerdo con las prácticas normales de la finca.

La fenología media de la finca se puede resumir en los siguientes datos medios:

- Brotación: 9-18 abril
- Floración: 30 mayo-3 junio
- Fruto cuajado: 7-11 junio
- Parada vegetativa de verano: 7-14 de julio
- Final fase endurecimiento del hueso, 2º crecimiento vegetativo: 1-5 septiembre
- Recolección: 2-10 noviembre

2.2 Descripción de los tratamientos de riego

El diseño del experimento fue con bloques totalmente al azar con 5 tratamientos de riego y 3 repeticiones.

Las parcelas elementales estaban formadas por 3 filas de 7 árboles cada una. Las distintas determinaciones se efectuaron sobre los 5 árboles centrales de la parcela elemental, constituyendo las dos filas laterales, filas de guarda (Fot. 11).



Fot. 11. Vista general de la parcela de ensayo. Se pueden observar diferencias vegetativas y productivas, según el tratamiento.

Las dosis de riego se conseguían con goteros autocompensantes de 2,5 l/h, separados 0,6 m, con 2,5 goteros por árbol. Los ramales estaban dotados de las pertinentes válvulas (Fot. 12) que permitían regular el agua aportada a los distintos tratamientos de riego.

Estas válvulas se calibraron previamente, antes del periodo diferencial de riego, para determinar el grado de cierre para cada uno de los tratamientos.



Fot. 12. Vista de la válvula que regula la aplicación de agua. En este caso corresponde a Riego Deficitario (RD)

Los riegos se aplicaron como la restitución del consumo acumulado (ETc), calculada a partir de los datos de ET₀ facilitados por la estación meteorológica del SIAR.

En todos los casos la temporada de riego cesaba desde poco después de la recolección hasta la aparición de los primeros brotes en primavera, que en la parcela de ensayo se correspondió al periodo desde Diciembre hasta principios de Abril.

Para definir los periodos de restricciones en el riego deficitario controlado (RDC), se tuvieron en cuenta una serie de circunstancias como son los estados fenológicos del olivo y las consecuencias del déficit en esos momentos.

Así pues, desde Abril a Junio (brotación, crecimiento inflorescencias y floración) la demanda hídrica fue totalmente satisfecha, para no interferir en la floración del año y en la brotación del año siguiente.

Esta situación se mantuvo hasta la parada vegetativa del verano, que coincide con la segunda fase de endurecimiento del hueso y caída de frutos (mediados de Julio).

En esos momentos y hasta el comienzo de la maduración parece que la sensibilidad al déficit hídrico es mínima en el olivo (Alegre et al, 2002; Goldhamer,

1999). Esta característica estaría ligada al cierre estomático debido al elevado déficit de Presión de vapor. Por ello durante esas fechas, que coinciden con la parada vegetativa de verano, los riegos se reducen y se limitan a mantener con un mínimo de funcionalidad las hojas, para que haya fotosíntesis. Por lo anterior se podrían reducir las dosis de riego sin afectar de forma considerable al olivo.

A partir de Septiembre-Octubre (crecimiento y maduración del fruto y acumulación de reservas para el año siguiente) la sensibilidad al déficit hídrico es máxima, por lo que se vuelve a evitar el déficit mediante aportaciones de agua de riego según la ET_c del cultivo.

Con las consideraciones anteriores los 5 tratamientos de riego fueron los descritos en la Tabla 8.

Tabla 8. Descripción esquemática y siglas con las que se identifican los Tratamientos de riego aplicados en el ensayo.

TRATAMIENTO	NOMBRE TRATAMIENTO	SIGLAS	DESCRIPCIÓN
T1	Control	CTL	100% ET _c
T2	Riego Deficitario controlado con estrés moderado	RDCEM	50% ET _c
T3	Riego Deficitario controlado con estrés severo	RDCES	25% ET _c
T4	Riego Deficitario	RD	50% ET _c toda la época de riego
T5	Dendrometría	Dendro	Riego según dendrometría

1. Tratamiento Control (CTL): mediante el riego se aporta la cantidad de agua que indica la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c), durante toda la campaña de riego.
2. Tratamiento de Riego Deficitario Controlado con Estrés Moderado (RDCEM): Riego del 50% de la ET_c durante la parada vegetativa del verano. Para conseguirlo se calibró previamente el cierre de la válvula en cada parcela experimental para que el aporte de agua fuese un 50% menor que el de la parcela control, en la que estaban abiertas al 100%.

3. Tratamiento de Riego Deficitario Controlado con Estrés Severo (RDCES): Riego del 25% de la ETc durante la parada vegetativa del verano, Para conseguirlo se calibró previamente el cierre de la válvula en cada parcela experimental para que el aporte de agua fuese un 25% menor que el de la parcela control en la que estaban abiertas al 100%.
4. Tratamiento de Riego Deficitario (RD): Riego del 50% de la durante toda la campaña de riegos, (Moriana et al, 2003).Para conseguirlo se calibró previamente el cierre de la válvula en cada parcela experimental para que el aporte de agua fuese un 50% de la parcela control, en la que estaban abiertas al 100%, manteniéndolas en esta posición durante todo el periodo de riego.
5. El quinto tratamiento de riego (Dendro): Riego tras dos días consecutivos de crecimiento negativo (disminución de diámetro de tronco según datos del dendrómetro) en la fase de parada vegetativa del verano. El volumen de agua aportado en cada riego equivalía a la ETc del día anterior. Para conseguirlo se mantenía totalmente cerrada la válvula de paso de agua, y cuando se detectaban dos días seguidos de crecimiento negativo, se abría totalmente, de forma que las parcelas se regaban ese día igual que la parcela control.

Para el T5 (Dendro), se instaló un dendrómetro en uno de los árboles de una de las parcelas del tratamiento, lo que permitió registrar la medida del diámetro del tronco en continuo. De esta forma se determinó el Crecimiento Diario (CD) como la diferencia entre el diámetro máximo del tronco entre dos días consecutivos. Según Moriana y Fereres (2002) la variación del CD puede ser un buen indicador del estado hídrico de la planta. Asimismo había instalado un dendrómetro en uno de los árboles del tratamiento control.

2.3 Cálculo de la ETc

La ETc se calculó según la fórmula:

$$ETc = ET0 \times Kc \times Kr$$

Los valores de la ET0 se tomaron de los datos proporcionados por el SIAR de La Rioja, calculados según el método de FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998) a partir de los datos obtenidos de una estación climática automática instalada en las proximidades de la finca.

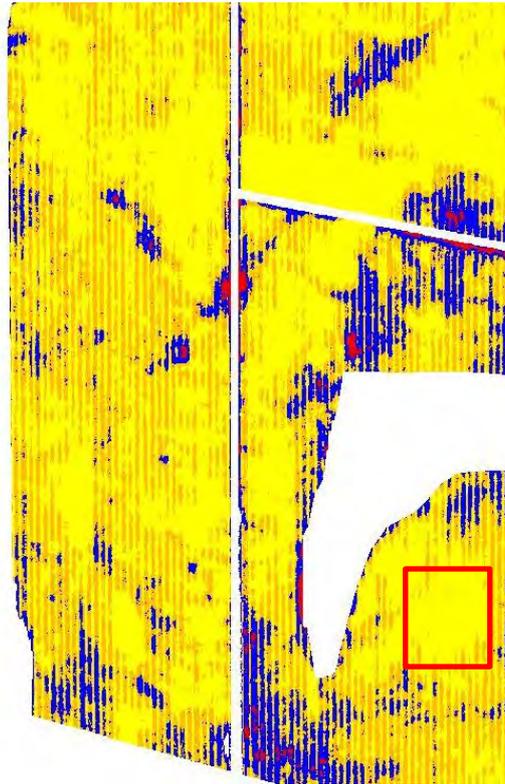
Se toma un coeficiente de cultivo del olivo constante $Kc = 0,7$ para un cultivo intensivo y en plena producción dado que se trata de un cultivo de hoja perenne (Giner, J.F., 1998; Girona et al., 2001).

El coeficiente de reducción Kr (Fereres y Castel, 1981) se calcula como:

$$Kr = 2 \times Sc/100$$

con Sc = superficie del suelo cubierta por la copa.,

Para el cálculo de la Sc se utilizó una fotografía del satélite LANDSAT de resolución 100 m x 100m (Fot. 13). Se asume que la superficie del suelo cubierta por la copa es la proyección horizontal de la copa de los árboles, que se calculó mediante la herramienta "sextante" del paquete informático Sistema de Información Geográfica quantum SIG.



Fot. 13. Fotografía del satélite LANDSAT de resolución 100 m x 100m del sector de la finca donde se realizó la experimentación. Cuadro rojo ubicación de las parcelas experimentales.

Se asume que la superficie del suelo cubierta por la copa es la proyección horizontal de la copa de los árboles, que se calculó mediante la herramienta “sextante” del paquete informático Sistema de Información Geográfica quantum SIG.

Los resultados proporcionaron una $Sc = 37,5\%$, por lo que se tomó como $Kr = 0,75$ constante para todos los años.

De forma que la ET_c se calculó como:

$$ET_c = ET_0 \times 0,7 \times 0,75$$

2.4 Aplicación de los tratamientos de riego

Como ya se ha dicho, el riego se hizo por medio de un riego por goteo. Las filas de árboles disponían de goteros autocompensantes de caudal de 2,5 l/h, separados 0,6 m, lo que suponía 2,5 goteros por árbol. Los ramales estaban dotados de las pertinentes válvulas que permitían regular el agua aportada.

Con los datos obtenidos de la estación climática del SIA más cercana (Autol), que se descargaban cada dos días, se calculaba la ETc de esos dos días, y con estos valores de ETc se aplicaba el riego en los dos días siguientes.

Por tanto, las parcelas Control se regaron aportando el 100% de la ETc, por medio de riegos diarios del promedio de la ETc de los dos días anteriores. Las parcelas control se regaron así durante toda la campaña de riego.

En el momento en que comenzaba el periodo de riego deficitario se calibraban la aperturas de las válvulas de forma que, en el tratamiento RDES, se aportaba el 25% de la dosis aplicada en el Control (CTL), en el RDEM, se aplicaba el 50% de la dosis del Control.

En el caso del RD, la dosis aplicada fue del 50% del Control, ya que las válvulas de regulación se mantuvieron semicerradas durante toda la época de riego.

Por último, en el caso del Dendro, durante el periodo de riego controlado se cerraba totalmente el agua, y cuando las medidas del crecimiento diario del tronco disminuían dos días consecutivos, se procedía a abrir la válvula de control totalmente, de forma que ese día de riego recibía la misma dosis que el tratamiento Control.

2.5 Dendrometría: Determinación de los momentos de riego.

Para llevar a cabo el riego en el tratamiento Dendro se instaló una estación Verdtech en una de las parcelas del tratamiento Dendro, así como otra en el tratamiento Control. Estas estaciones Verdtech utilizaban distintos sensores para registrar variables de suelo, planta y clima.

Así pues, se tomaron registros de los siguientes sensores: un sensor C-Probe (Fot. 14), que nos permitía medir en continuo el contenido volumétrico de agua en el suelo a distintas profundidades 20 cm y 50 cm; un pluviómetro (Pronamic Co., Ltd., Denmark) para el registro de la lluvia; un dendrómetro radial Plantsens (Verdtech un Nuevo Campo S.A., Spain), para monitorizar las variaciones diarias del diámetro del tronco.



Fot. 14. Sensor C-Probe instalado en una de las estaciones Verdtech de la finca.

Los Dendrómetros se instalaron a unos 20 cm del suelo, en una zona libre de cicatrices. El punto de contacto de cada dendrómetro se pega a la superficie de los tejidos vivos de la corteza con una masilla estándar para las heridas de poda.

Cada C-Probe se insertó en el suelo cerca de la línea de goteros y entre dos árboles consecutivos.

Cada estación Verdtech tenía una unidad telemétrica en remoto addWAVE A733GSM (AdconTelemetry, Austria) (Fot. 15), para el almacenamiento y transmisión de datos, así como un pequeño panel solar para alimentar todos los sensores y la unidad telemétrica.



Fot. 15. Estación Verdtech instalada en una de las parcelas experimentales de la finca

Las estaciones almacenaban los datos medios de cada 15 minutos de todas variables registradas. Mediante el software Advantage PRO se podían visualizar los gráficos de planta, clima y suelo, lo que permitía un seguimiento diario del estado hídrico de la planta y relacionarlo con el contenido de humedad del suelo, así como con distintos parámetros climáticos (Lluvia, T^a ; HR, etc).

2.6 Determinaciones realizadas

Durante los tres años de estudio se realizaron una serie de mediciones y controles con el fin de determinar la influencia del riego deficitario tanto en el desarrollo vegetativo del cultivo, como en la producción y la calidad de esta.

Para ello al inicio de la experiencia se marcaron 5 árboles centrales en cada parcela elemental (árboles control), sobre los que se hicieron las distintas determinaciones del desarrollo vegetativo y de parámetros de producción. Las determinaciones de calidad se realizaron sobre los aceites obtenidos de la producción de cada una de las parcelas.,

2.6.1 Determinaciones realizadas sobre el desarrollo vegetativo del cultivo

Se establecieron 5 fechas a lo largo del desarrollo vegetativo del árbol, en las cuales se realizaron distintas determinaciones a lo largo de los tres años de ensayo.

Estas fechas coinciden con estados fenológicos del árbol:

- (I) 15 días después de la brotación
- (II) Prefloración
- (III) 5 semanas después del cuajado del fruto
- (IV) Inicio de la maduración del fruto
- (V) Antes de la cosecha.

Las determinaciones realizadas en cada una de las fechas se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Medidas realizadas en los árboles control y momentos de efectuarlas

Determinaciones	I	II	III	IV	V
Altura del árbol (cm)	X	X	X	X	X
Diámetro base del tronco (mm)	X	X	X	X	X
Longitud de los brotes laterales (cm)	X	X	X	X	X

Como medidas del crecimiento del olivo se midió la altura del árbol a lo largo del desarrollo vegetativo (Fot. 16). Estas medidas se llevaron a cabo en las cinco fechas descritas en la Tabla 9.



Fot. 16. Toma de datos de parámetros de crecimiento vegetativo, altura del árbol, en las parcelas de ensayo

Así mismo, y en las mismas fechas, se midió el diámetro del tronco. Para ello se midió con un calibre el diámetro a una altura de unos 15 cm de altura de tronco.

Las variaciones de los troncos se pueden expresar según los índices propuestos por Kozlowiski (1967) citado por Ginestar y Castel. (1995):

1. Dmax, diámetro máximo observado durante el día. El crecimiento diario (CD) vendría expresado por la diferencia entre los máximos observados en días consecutivos. El crecimiento medio a más largo plazo puede obtenerse por el análisis de la pendiente del Dmax frente al tiempo.
2. Amplitud de las oscilaciones, A, diferencia entre el máximo diámetro registrado por la mañana y el mínimo observado al atardecer. Esta variación del diámetro representa el aporte del agua del floema a la transpiración (Moltz y Klepper, 1972).

Como última determinación del crecimiento vegetativo se seleccionaron dos brotes laterales de fructificación en el tercio superior de cada uno de los árboles control de cada parcela elemental. Se marcaron por medio de etiquetas indelebles (Fot. 17).



Fot. 17. Árboles de una parcela de ensayo con etiquetas indelebles para marcar las ramas en las que se hacían las determinaciones de crecimiento vegetativo y productivo.

Sobre cada uno de los brotes así marcados se midió la longitud total a lo largo del desarrollo vegetativo en cinco momentos del desarrollo vegetativo.

2.6.2 Determinaciones de producción

En los brotes fructíferos marcados se tomaron una serie de medidas relacionadas con la producción.

nº de flores por brote

Tras la brotación y antes de la floración se contabilizaron el nº inflorescencias en los dos brotes marcados por árbol. Simultáneamente a la determinación del nº de inflorescencias por brote, se contabilizaron el nº de flores en cada una de las inflorescencias desarrolladas en los brotes marcados, de forma que el producto de estos dos parámetros se estableció como el nº de flores por brote.



Fot. 18. Inflorescencia en plena floración

Nº de frutos cuajados

Tras 5 semanas después de plena floración-inicio del cuajado, en el que el cuajado y la caída de frutos ya se habían producido, se contaron el nº de frutos cuajados por inflorescencia en cada uno de los dos brotes marcados por árbol.



Fot. 19. Aspecto de las inflorescencias tras el cuajado y caída de frutos

Peso de 100 frutos

A partir del cuajado de frutos se tomaron muestras de 100 frutos a lo largo de la maduración y se pesaron.

Los 100 frutos se recogieron de forma aleatoria de los brotes centrales de los cinco árboles centrales de las parcelas de ensayo.

El control del peso de 100 frutos se hizo en tres momentos, a las 5 semanas desde plena floración, al inicio de la maduración y en el momento de la recolección.

Peso de cosecha

En el momento de la cosecha se recolectó manualmente la cosecha de un árbol por tratamiento.

A partir del dato de producción de un árbol se extrapoló la producción total por superficie.

Índice de madurez

El Índice de Madurez (IM) se determinó en una muestra de 100 frutos de acuerdo con el método propuesto por el Instituto Nacional de Investigación de España (INIA), basado en una evaluación subjetiva del color de la piel y de la pulpa de la aceituna.



Fot. 20. Muestra de aceitunas sobre los que se determinaba el Índice de madurez según el método propuesto por el INIA de escala de color 0-7.

El proceso consiste en la toma de una muestra de un kg, rodeando el árbol y a la altura del operador. De esta muestra una vez homogeneizada se toma una muestra aleatoria de 100 frutos, y se clasifican estos frutos según ocho grupos de coloración (escala 0-7):

N=0; verde intenso

N=1; verde amarillento

N=2; verde con puntos rojizos

N=3; marrón rojizo

N=4; negro con la pulpa blanca

N=5; negro con menos del 50% de la pulpa morada

N=6; negro con al menos el 50% o más de la pulpa morada

N=7; negro con el 100% de la pulpa morada

El Índice se expresa como:

$$IM = \sum (N_i \times n_i) / 100$$

Donde N es el nº del grupo, n es el nº de frutos de ese grupo. Por lo tanto los valores del Índice de madurez oscilarán del 0 al 7.

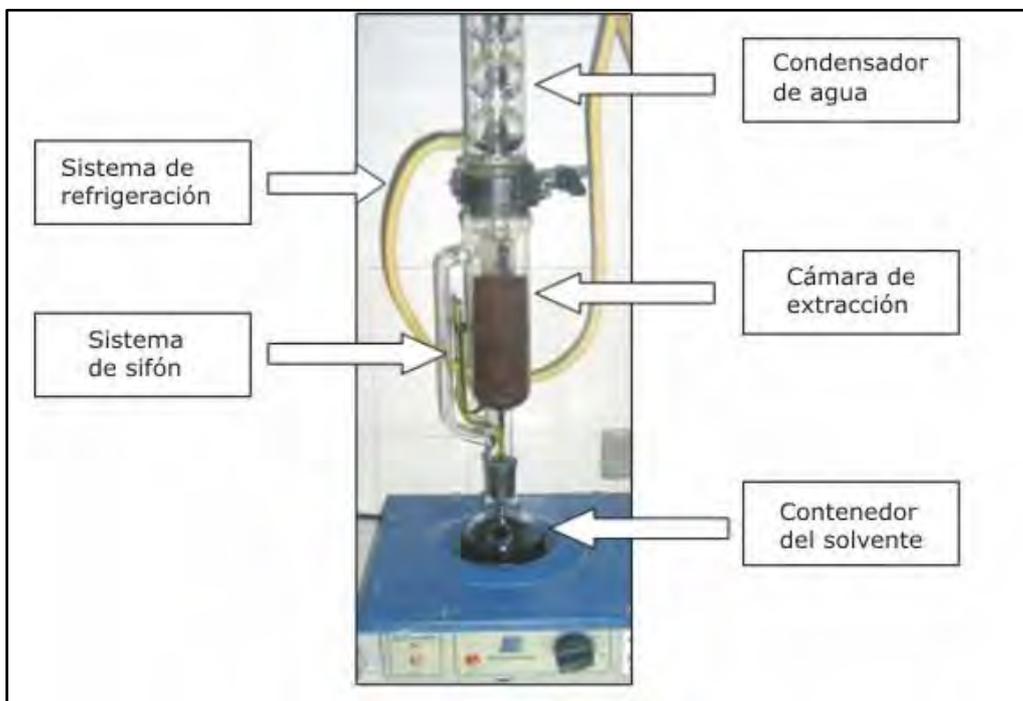
Determinación del contenido en aceite

El contenido de aceite de la oliva se determinó por medio de la desecación de una muestra de aceitunas molidas que al ponerlo en contacto con un disolvente orgánico produciéndose una dilución de la grasa que posteriormente se separa de acuerdo con el método estándar español de extracción Soxhlet y se expresó como porcentaje sobre peso de materia seca (UNE 55020, 1973):

3. Preparación de la muestra: Se muelen un conjunto de 100 aceitunas, se pesa en una capsula previamente tarada entre 30-40 gramos de la masa homogeneizada y se introduce en una estufa a 105 °C hasta su secado total.
4. Una vez la muestra esta seca y enfriada se vuelve a pesar para determinar el agua perdida, obteniendo de esta diferencia de peso el % de humedad de la muestra.

5. El producto desecado, se envuelve en un filtro plegado y se introduce en el cuerpo central del extractor Soxhlet (Fot. 21).
 6. Una vez colocado el cartucho en el extractor, se acopla en su parte inferior un matraz previamente tarado y se adiciona el solvente.
 7. Extraer la muestra con solvente durante 6 - 8 horas a una velocidad de condensación de 3-6 gotas/s.
 8. Cuando se completa la extracción eliminar el solvente en rotavapor o evaporando con precaución bajo campana, hasta que se evapore todo el éter.
 9. Secar el matraz en estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 30 min, enfriar en desecador y pesar.
10. CALCULO Y EXPRESION DE RESULTADOS

$$\% \text{ Grasa} = \frac{g \text{ grasa en la muestra} * 100}{g \text{ de muestra seca}}$$



Fot. 21. Esquema de las distintas partes que componen un Extractor Soxhlet con fuente de calor por "baño maría"

Los resultados se informan en % de materia grasa. Promediar los valores obtenidos y expresar el resultado con 2 decimales.

Producción de aceite

La determinación de la producción de aceite se hizo por medio de un extractor Abencor. Es un extractor que determina el rendimiento industrial de la aceituna, mediante la reproducción, a escala de laboratorio, del proceso industrial, y siguiendo las mismas fases: molienda, batido, centrifugación y decantación (Martínez et al., 1975).

La planta piloto de extracción utilizada consistía en tres elementos básicos:

11. un molino de martillos de acero inoxidable, dotado de cribas intercambiables, para obtención de distintos grados de molienda.
12. una termobatidora múltiple con capacidad para procesar 8 muestras simultáneamente, dotada de termostato para regular la T^a del baño de agua.
13. una centrifugadora de pulpa, de tipo cesta, en acero inoxidable, con bol, con velocidad de giro a 3.500 r.p.m.



Fot. 22. Extractor Abencor donde se procesaron las muestras (Laboratorios oficiales de La Grajera, en Logroño (La Rioja))

El procedimiento de determinación se realiza según los siguientes pasos:

14. Se muele, aproximadamente 1 kg de aceituna. La masa se recoge en una bandeja, y se homogeneiza.
15. Se pesan 600-700 g de la pasta en el recipiente de la batidora y se somete a batido en baño de agua durante 20 minutos, regulando el termostato para que la T^a de la pasta no supere los 25 ° C.
16. A continuación se añaden 300 ml de agua hirviendo y se continúa 10 minutos más.
17. Una vez terminado el batido, se vierte la totalidad de la pasta en la centrifuga, se pone en funcionamiento durante 1 minuto y se recoge el mosto oleoso por la parte inferior en una probeta graduada.
18. El recipiente de la batidora se enjuaga con 100 ml de agua hirviendo. Esta agua se vierte en la centrífuga, limpiando bien las paredes, se acciona un minuto más, recogiendo el líquido por la parte inferior.
19. El aceite se separó por decantación durante 10 minutos mediante la utilización de probetas para decantación de líquidos y medida del aceite obtenido.

Cálculos:

El rendimiento industrial, en % sobre peso fresco, se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Aceite de la muestra} = \frac{\text{ml de aceite obtenido} * 0,915}{\text{gramos de pasta batida}} * 100$$

Las muestras de aceite así obtenidas se pasaban a unos recipientes de cristal oscuro y se conservaban en oscuridad a 4°C.

Eficiencia en el uso del agua (FWUE)

Este parámetro expresa los kilogramos de cosecha producidos por cada litro de agua aplicado para cada uno de los tratamientos:

$$\text{FWUE (Kg/l)} = \text{Producción total (Kg/m}^2\text{)} / \text{Agua de riego (mm)}$$

Este parámetro se utiliza también en relación a la producción aceite por m², en vez sobre la producción de aceituna.

Valor que no tiene por qué coincidir con el mayor aporte de agua, sino que restricciones de agua en según qué periodos vegetativos favorecen una mayor producción tanto de kg de aceitunas como de kg de aceite por m².

En la Tabla 10 se detallan de forma esquemática los controles y épocas en que se realizaron las distintas determinaciones de producción a lo largo de los tres años de ensayo.

Tabla 10. Medidas y Determinaciones de producción realizadas en los árboles control y momentos de efectuarlas.

Determinaciones	I	II	III	IV	V
Número de flores/brote		X			
Número de frutos/ brote			X		
Peso de 100 aceitunas (g)			X	X	X
Peso de la cosecha de un árbol (kg)					X
Índice de Madurez (IM) (escala 0-7)					X
Rendimiento graso (Soxhlet)					X
Producción de aceite (Kg/Ha)					X
Eficiencia del riego					X

2.6.3 Determinación de la calidad del aceite.

Una vez se extrajo el contenido de aceite de los distintos tratamientos se determinaron una serie de parámetros en relación a la calidad del aceite, con el fin de estudiar la posible influencia de los distintos regímenes de riego en la calidad del producto final.

El aceite obtenido por el método Abencor se reservó para realizar las distintas determinaciones de calidad del aceite según el Reglamento (CE) n° 702/2007.

Las determinaciones realizadas se centraron en la determinación de los parámetros utilizados para la clasificación de los aceites oliva virgen extra, según la Denominación de Origen Rioja (Orden 32/2004). Así pues, se determinó la acidez libre, el índice de peróxidos y la absorbancia a 232 y 270 nm (K230 y K270).

El grado de acidez es el resultado de expresar el porcentaje de ácidos grasos, sobre el supuesto de que el peso molecular del ácido libre es igual al del ácido oleico.

El índice de peróxidos, es la medida de su contenido en oxígeno activo, expresado en miliequivalentes de oxígeno por kg de aceite. Cuando el aceite contiene peróxidos es que ha tenido lugar una oxidación.

Los índices K230 y K270, son indicativos de la calidad del aceite, en cuanto a su estado de conservación y las modificaciones producidas por los procesos tecnológicos.

Por otro lado, se determinó la composición de ácidos grasos mediante análisis por Resonancia Magnética Nuclear o RMN.

Esta es una técnica espectroscópica, no destructiva de análisis en disolución que permite un estudio estructural sin tratamientos previos y con la posibilidad de hacerlos en medios acuosos. Esta técnica permite el estudio de la muestra sin ningún tipo de alteración ni de intervención química, lo que permite hacer numerosos análisis en un corto periodo de tiempo.

La proporción de ácidos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados es una característica identificativas de cada tipo de aceite. La presencia de una alta cantidad de aceite oleico es una particularidad del aceite de oliva. Mediante la RMN de protón se puede determinar el porcentaje de los diferentes ácidos grasos en tiempo muy corto.

Así pues, se determinó la proporción de ácido oleico, ácido linoleico, ácido linolénico, y ácido saturados, mediante el uso de un RMN modelo Broker Avance 400, equipado con una sonda BBI H-BB Z-GRA.

Los análisis de calidad del aceite fueron realizados en los laboratorios oficiales de La Grajera, en Logroño (La Rioja).



Fot. 23. Equipo de RMN modelo Broker Avance 400 de los laboratorios oficiales de La Grajera donde se realizaron los análisis de calidad del aceite.

2.7 Análisis estadísticos realizados.

Las respuestas de las variables fisiológicas y de crecimiento a los distintos tratamientos de riego se analizaron estadísticamente mediante un análisis de la varianza (ANOVA), una vez comprobada la normalidad (test de Shapiro-Wilks) y la homocedasticidad de los datos (test de Levene). Cuando se encontraron diferencias significativas entre las medias se procedió a realizar un test de Tukey para comparar los diferentes tratamientos (LSD). Para aquellas variables que no cumplieron los requisitos de normalidad y homocedasticidad se utilizó el test de Kruskal-Wallis. Todo el tratamiento estadístico se realizó mediante el programa de ordenador IBM SPSS Statistics 19.0 para Windows (IBM Corporation, Armonk, NY, USA).

Resultados y Discusión

3 Resultados y discusión

3.1 Agua aplicada en los distintos tratamientos de riego

En la Tabla 11 se detallan las ET₀ calculadas por FAO-Penman Monteith (Allen et al., 1998) a lo largo de todo el año y las ET_c calculadas para el periodo de riego del cultivo en los tres años de ensayo, según lo descrito, así como la precipitación a lo largo del año.

Tabla 11. Evapotranspiración potencial mensual (ET₀), precipitación mensual acumulada (P ac.), coeficiente de cultivo (K_c) y coeficiente de sombreado (K_s), y Evapotranspiración de cultivo mensual (ET_c) en los años de ensayo (Año 2006, 2007 y 2008).

AÑO 2006					
	ET₀ (mm)	P ac. (mm)	K_c	K_s	ET_c (mm)
Enero	22,7	27,5	0	0,75	0,0
Febrero	42,6	43,4	0	0,75	0,0
Marzo	73,6	18,6	0	0,75	0,0
Abril	100,9	45,8	0,7	0,75	53,0
Mayo	137,6	42,1	0,7	0,75	72,2
Junio	165,4	87,2	0,7	0,75	86,8
Julio	175,1	29,7	0,7	0,75	91,9
Agosto	153,6	9,9	0,7	0,75	80,6
Septiembre	95,6	60,5	0,7	0,75	50,2
Octubre	66,6	12,5	0,7	0,75	35,0
Noviembre	31,5	33,4	0	0,75	0,0
Diciembre	19,6	6,2	0	0,75	0,0
Total	1084,8	416,8			469,8

AÑO 2007					
	ET0 (mm)	P ac. (mm)	Kc	Ks	ETc (mm)
Enero	24	14,2	0	0,75	0,0
Febrero	38,2	36,8	0	0,75	0,0
Marzo	66,1	80,2	0	0,75	0,0
Abril	89,1	85,7	0,7	0,75	46,8
Mayo	123,0	62,2	0,7	0,75	64,6
Junio	140,5	20	0,7	0,75	73,8
Julio	176,4	1	0,7	0,75	92,6
Agosto	149,2	9,1	0,7	0,75	78,3
Septiembre	109,1	21,1	0,7	0,75	57,3
Octubre	62,8	48,5	0,7	0,75	33,0
Noviembre	46	7,1	0	0,75	0,0
Diciembre	22,2	39,7	0	0,75	0,0
Total	1046,6	425,6			446,3
AÑO 2008					
	ET0 (mm)	P ac. (mm)	Kc	Ks	ETc (mm)
Enero	25,9	9,6	0	0,75	0,0
Febrero	33,8	14,9	0	0,75	0,0
Marzo	73,6	39,5	0	0,75	0,0
Abril	112,5	30,7	0,7	0,75	59,1
Mayo	100,4	130,1	0,7	0,75	52,7
Junio	137,5	79,3	0,7	0,75	72,2
Julio	163,9	21,9	0,7	0,75	86,0
Agosto	149,8	2,4	0,7	0,75	78,6
Septiembre	100,9	13,8	0,7	0,75	53,0
Octubre	54,9	39,8	0,7	0,75	28,8
Noviembre	33,2	91,9	0	0,75	0,0
Diciembre	21,8	57,2	0	0,75	0,0
Total	990,7	560,4			430,4

En todos los años de ensayo el periodo de riego comenzó el mes de Abril y se prolongó hasta finales del mes de Octubre, justo antes de la recolección que se realizó la primera quincena de Noviembre.

Los tres años pueden considerarse como normales desde un punto de vista climático mediterráneo. Se han calculado las precipitaciones efectivas por si hubiera que tenerlas en cuenta en el cálculo de las necesidades de riego.

Para el cálculo se utilizaron las fórmulas propuestas por Brouwer y Heibloem, de forma que en función de la precipitación caída durante el mes tenemos:

$$Pe = 0.8 P - 25 \text{ Si: } P > 75 \text{ mm/mes}$$

$$Pe = 0.6 P - 10 \text{ Si: } P < 75 \text{ mm/mes}$$

Dónde:

P = precipitación mensual (mm/mes)

Pe = precipitación efectiva (mm/mes)

Los resultados así obtenidos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Precipitaciones efectivas mensuales (mm/mes) calculadas según el método descrito por Brouwer y Heibloem

	2006	2007	2008
Enero	6,86	0	0
Febrero	16,04	12,1	0
Marzo	1,16	39,2	13,6
Abril	17,48	43,6	0,0
Mayo	15,26	27,3	79,0
Junio	44,76	2,0	38,4
Julio	0,8	0	3,1
Agosto	0	0	0
Septiembre	26,3	2,7	0
Octubre	0	19,1	13,9
Noviembre	10,04	0	48,5
Diciembre	0	13,6	23,3

Como ocurre con mucha frecuencia en nuestras latitudes, las precipitaciones efectivas durante el periodo de máximo estrés del árbol (Julio y Agosto) son despreciables. En este sentido no han sido consideradas para el manejo de los riegos.

Como consecuencia de lo anterior, el agua aplicada con los riegos varía poco de un año a otro en las estrategias que usan la ETc como base del cálculo del riego, es decir en el Control, en el riego deficitario controlado con estrés severo (RDCES), en el riego deficitario controlado con estrés moderado (RDCEM) y en el riego deficitario a lo largo de todo el periodo de riego (RD). Esto se observa con claridad en la Tabla 13 donde se resume el agua aplicada mensualmente y el total por tratamiento, en los 3 años de la experiencia.

Tabla 13. Agua aplicada mensualmente (mm) en cada uno de los tratamientos de riego durante los 3 años de la experiencia.

Año 2006								
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Total
Control	53,0	72,2	86,8	91,9	80,6	50,2	35,0	469,8
RDCEM	53,0	72,2	86,8	46,0	40,3	50,2	35,0	383,5
RDCES	53,0	72,2	86,8	23,0	20,2	50,2	35,0	340,3
RD	26,5	36,1	43,4	46,0	40,3	25,1	17,5	234,9
Dentro	53,0	72,2	86,8	11,6	18,6	50,2	35,0	327,4
Año 2007								
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Total
Control	46,8	64,6	73,8	92,6	78,3	57,3	33,0	446,3
RDCEM	46,8	64,6	73,8	46,3	39,2	57,3	33,0	360,8
RDCES	46,8	64,6	73,8	23,2	19,6	57,3	33,0	318,1
RD	23,4	32,3	36,9	46,3	39,2	28,6	16,5	223,2
Dentro	46,8	64,6	73,8	22,0	21,6	49,1	28,3	306,1
Año 2008								
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Total
Control	59,1	52,7	72,2	86,0	78,6	53,0	28,8	430,4
RDCEM	59,1	52,7	72,2	43,0	39,3	53,0	28,8	348,1
RDCES	59,1	52,7	72,2	21,5	19,7	53,0	28,8	306,9
RD	29,53	26,4	36,1	43,0	39,3	26,5	14,4	215,2
Dentro	59,06	52,7	72,2	7,0	19,8	53,0	28,8	292,5

En el tratamiento Dendro el agua aplicada no estaba relacionado únicamente con la ETc, sino que el cultivo se regaba cuando se suponía que el árbol estaba estresado. De forma que en el aporte de agua influían la demanda evaporativa, el estado de humedad del suelo y las reservas acumuladas por el suelo y por el propio árbol para regular su transpiración.

En la Figura 4 se representa el crecimiento diario como la diferencia de los diámetros de tronco máximos entre dos días consecutivos, de forma que cuando este crecimiento diario era de signo negativo durante dos días seguidos se procedía a aplicar un riego en la misma cantidad en la que se regaba el Control.

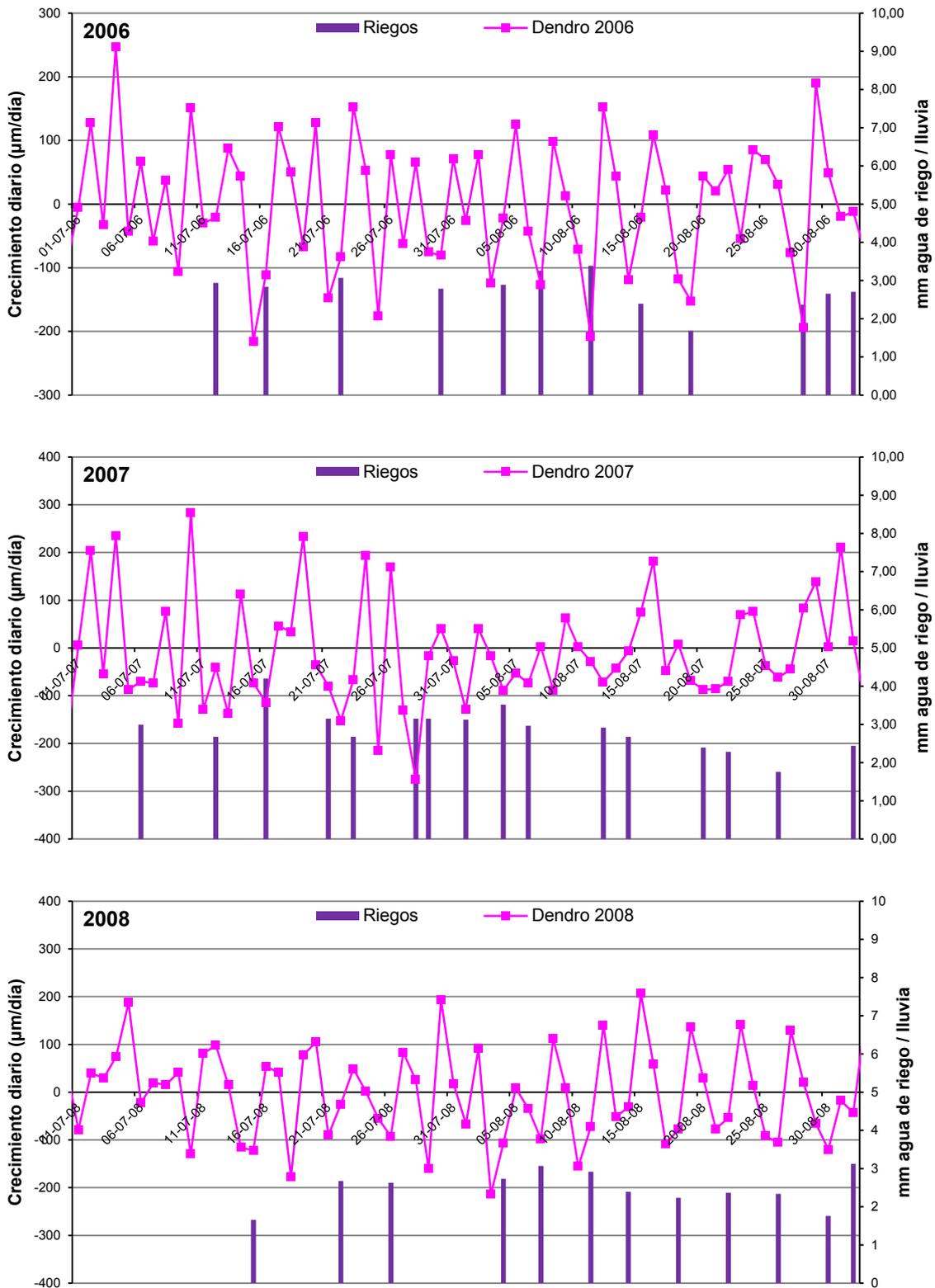


Figura 4. Evolución del crecimiento diario de tronco ($\mu\text{m}/\text{día}$) en el tratamiento Dentro a lo largo del periodo de parada vegetativa estival (Julio-Agosto) en los tres años de la experiencia, y riegos aplicados en cada uno de los años de ensayo en respuesta a decrecimientos del tronco de dos días con 333333 segundos.

Así pues, el número de riegos aplicados en el tratamiento Dendro durante el periodo de parada vegetativa en comparación con el Control, y restos de tratamientos, (Tabla 14) es inferior ya que no se riega diariamente sino cuando el árbol expresa un crecimiento negativo del diámetro del tronco dos días consecutivos.

Tabla 14. Número de días de riego durante el periodo de riego deficitario (Julio y Agosto) en el tratamiento Dendro en comparación con el Control (riego diario), en los tres años de experiencia.

Tratamiento	2006	2007	2008
Control	61	61	61
Dendro	12	16	12

Esta de forma de regar se traduce en que durante los meses de Julio y Agosto el tratamiento Dendro recibe una cantidad total de agua similar o incluso menor a la del tratamiento RDCES, como se ha visto en la Tabla 13.

Como se observa el año 2006 el nº de riegos es menor que en el 2007 a pesar de que la evapotranspiración en el periodo de parada vegetativa fue similar (Tabla 11). Esto se explica porque a inicios de Julio de 2006 el suelo estaba totalmente cargado de agua (en torno al 30% de humedad a 20 cm de profundidad) y el árbol no comienza a disponer de sus reservas hasta mediados de Julio, cuando la humedad del suelo a 20 cm se sitúa por debajo del 25%. Además en el 2006 hubo alguna lluvia a mediados de Julio, que permitió mantener un mejor estado hídrico del árbol sin necesidad de tener que aportar tantos riegos como en el 2007 en el que durante el periodo de parada vegetativa las lluvias fueron especialmente escasas.

En 2008 sucede algo parecido al 2006: el suelo está cargado de humedad, en este caso por encima del 40% por la lluvias de finales de Junio, y además hubo episodios de lluvias a mediados de Julio (Figura 5-2008), lo que hizo que en los primeros días de aplicación del riego deficitario los riegos fuesen escasos, y que hasta finales de Julio no se comenzara a regar de una forma más continuada.

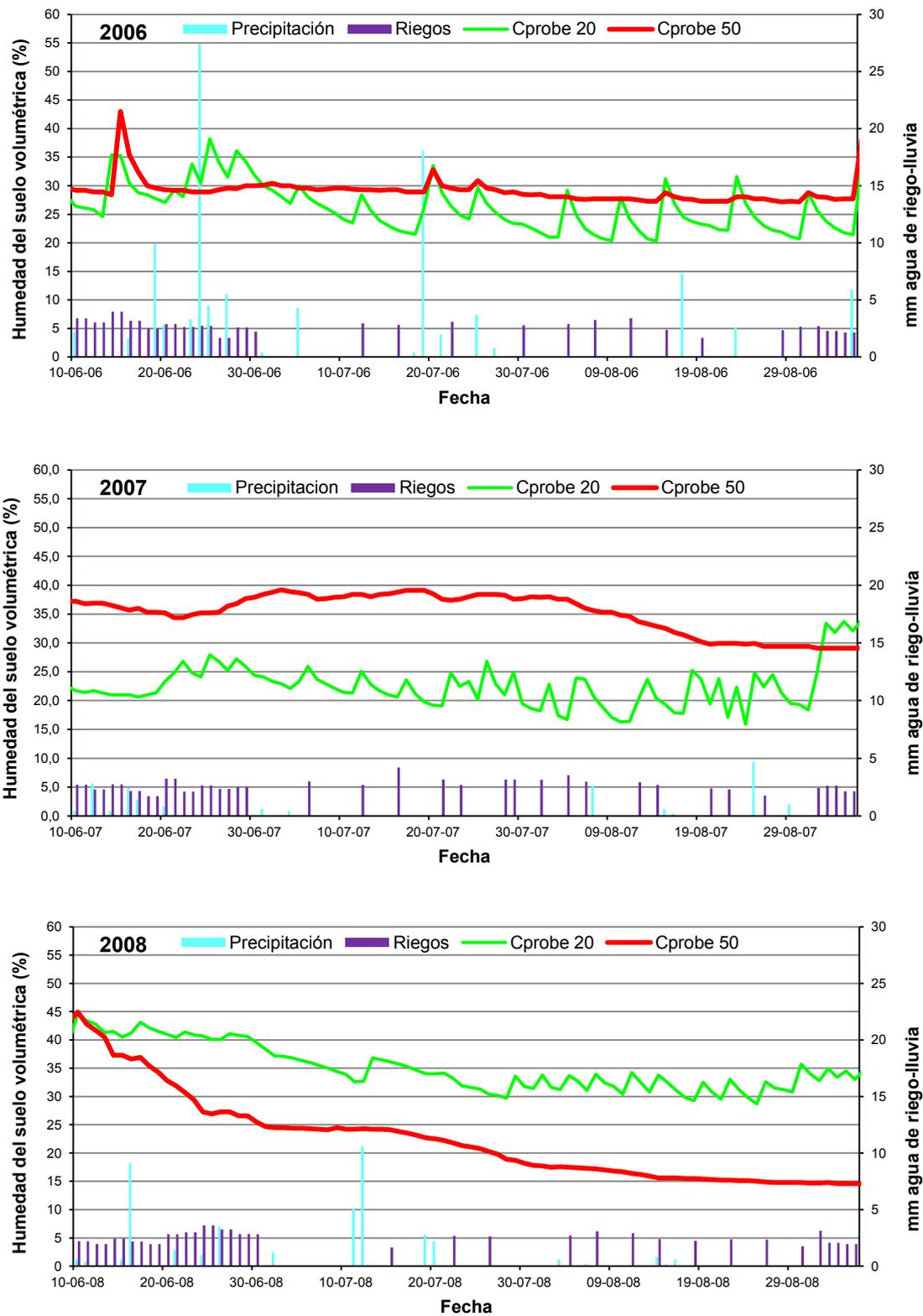


Figura 5. Evolución de la humedad del suelo (%) a 20 y 50 cm de profundidad en el tratamiento Dendro previa y durante el periodo de riego deficitario (desde el 10 de junio al 5 de Septiembre) en los tres años de experiencia. El gráfico de barras representa las lluvias y los riegos aplicados en el periodo estudiado.

Hay que apuntar que se supone que en el año 2008 hay un mayor desarrollo del sistema radicular, lo que implica que el árbol es capaz de tomar agua de perfiles más profundos (curva Cprobe 50). Esto ayuda a mantener un mejor estado hídrico en la planta y a que no sean necesarios riegos tan frecuentes, por lo que nuevamente el nº de riegos aplicados en el 2008 en el tratamiento Dendro descende hasta 12.

De esta forma, los ahorros de riego que se consiguieron con las distintas estrategias de riego tienen diferencias significativas con respecto al Control (Tabla 15).

Tabla 15. Ahorro de agua de riego anual (%) en los distintos tratamientos con respecto al Control (Año 2006, 2007 y 2008).

Tratamiento	Ahorro agua (%)				
	2006	2007	2008	Promedio	
Control	0,0	0,0	0,0	0,0	a
RDCEM	18,4	19,2	19,1	18,9	b
RDCES	27,6	28,7	28,7	28,3	c
RD	50,0	50,0	50,0	50,0	d
Dendro	30,3	31,4	32,0	31,2	c

Evidentemente, el ahorro del 50% corresponde al tratamiento RD puesto que limita la cantidad de agua a aplicar a la mitad a lo largo de toda la campaña. El tratamiento RDCES supone un ahorro medio en torno al 28,3% en los tres años de la experiencia, aunque este ahorro de agua se ha producido en un espacio de tiempo mucho más corto, solo en los meses de Julio y Agosto de cada año.

La estrategia RDCEM es la que más cantidad de agua aplica de todas las ensayadas, con cerca al 19% de ahorro de agua, pero también mantiene diferencias significativas con respecto al Control.

Por último, la estrategia Dendro también consigue importantes ahorros de agua en los tres años de ensayo. La media ha resultado ser del 31,2%, algo superior al alcanzado en el RDCES pero sin diferencias significativas con éste.

Aunque las estrategias de riego RDCES y Dendro no tienen diferencias significativas en cuanto al ahorro de agua de riego, vamos a ver más adelante como la respuesta del árbol, tanto en los parámetros vegetativos como productivos, ha sido diferente entre ambos tratamientos.

3.2 Respuesta del desarrollo vegetativo a los distintos tratamientos de riego.

El volumen de agua aplicado ha resultado tener influencia en los distintos parámetros de crecimiento vegetativo estudiados: altura del árbol, diámetro de tronco y crecimiento de brotes laterales, como vamos a estudiar en los siguientes puntos

3.2.1 Desarrollo vegetativo medido por dendrometría. Tratamiento Dendro vs Control

Como ya se ha comentado, para poder comparar la respuesta del árbol en las estrategias Dendro y Control se instalaron sendos dendrómetros en árboles representativos de cada tesis.

Los datos registrados por los dendrómetros nos permiten ver las variaciones del diámetro de tronco a lo largo del día y entre días consecutivos. Lo que se observa es que el diámetro del tronco crece desde el atardecer (cuando la demanda evaporativa es menor), hasta el amanecer del día siguiente cuando la demanda evaporativa aumenta y el diámetro decrece. Si estas observaciones las hacemos en distintos momentos del desarrollo vegetativo del árbol se puede observar los diferentes comportamientos del árbol dependiendo de la demanda evaporativa y de la disponibilidad de agua en el suelo.

Así pues, pues como se observa en la Figura 6, en condiciones de baja demanda evaporativa (mes de Abril) y alta disponibilidad de agua en el suelo, el diámetro del tronco aumenta de una mañana a la siguiente mientras que durante el día no se producen decrecimientos y apenas se ven ligeras modificaciones en el diámetro. Esta fase corresponde a un crecimiento activo del árbol.

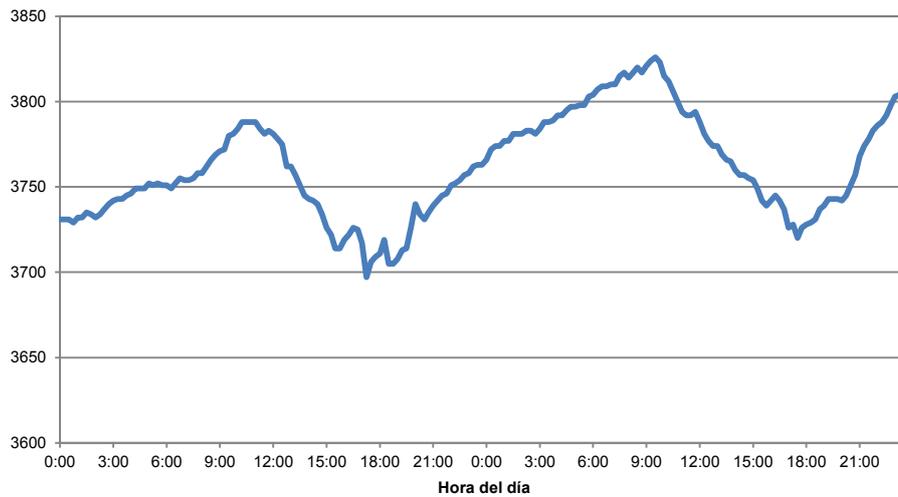


Figura 6. Comportamiento del crecimiento del diámetro del tronco (μm) en periodos de baja demanda evaporativa y disponibilidad de agua en el suelo. Los datos corresponden a los días 07/04/2008 a las 00:00 hasta el 08/04/2008 a las 24:00.

En cambio, en condiciones de alta demanda evaporativa (mes de Agosto) y escasa disponibilidad de agua en el suelo hay una reducción neta del diámetro del tronco con una recuperación solo parcial durante la noche. Este modelo correspondería a un momento de estrés hídrico de la planta (Figura 7).

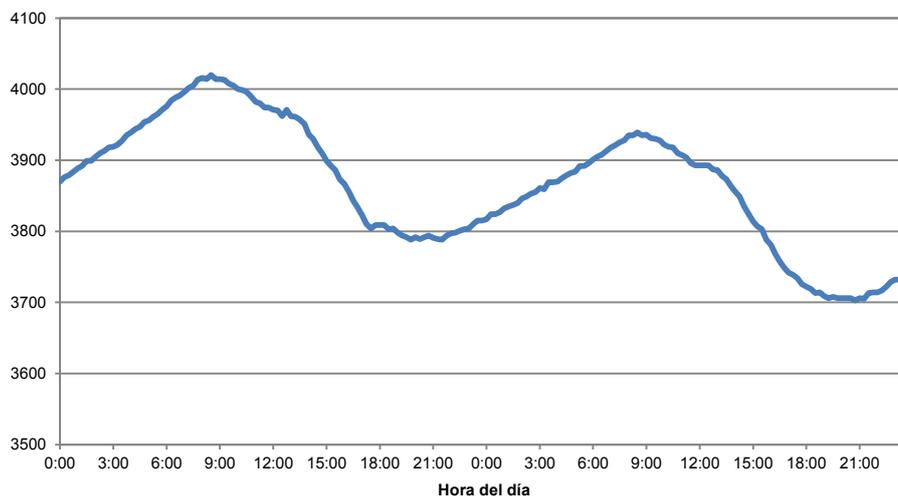


Figura 7. Comportamiento del crecimiento del diámetro del tronco en periodos de alta demanda evaporativa y baja disponibilidad de agua en el suelo. Los datos corresponden a los días 06/08/2008 a las 00:00 hasta el 07/08/2008 a las 24:00.

Por último, tendríamos momentos con una alta demanda evaporativa (mes de Junio) y alta disponibilidad de agua en el suelo, donde se produce un aumento del diámetro del tronco de una mañana a la siguiente. Pero en este caso, durante el día se pueden apreciar descensos considerables del diámetro, por lo que se podría caracterizar a este periodo como de una combinación de crecimiento diario y rehidratación de los tejidos.

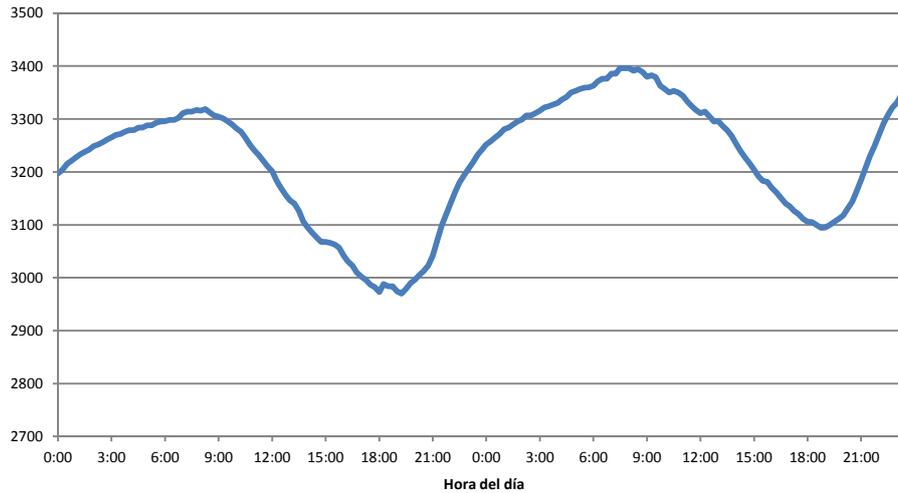


Figura 8. Comportamiento del crecimiento del diámetro del tronco en periodos de baja demanda evaporativa y disponibilidad de agua en el suelo. Los datos corresponden a los días 07/06/2008 a las 00:00 hasta el 08/06/2008 a las 24:00.

Este comportamiento del crecimiento diario del tronco viene a confirmar lo ya visto por Lassoie, (1979).

Estos resultados también coinciden con los obtenidos por Goldhamer y Fereres, (2001), Ortuño et al., (2004a) y Moreno et al. (2013) quienes encuentran que la evolución del diámetro máximo del tronco (MXTD) y del diámetro mínimo del tronco (MNTD) proporcionan información muy útil. La alta sensibilidad del MNTD al estrés hídrico reflejaría el efecto combinado del suministro de agua del suelo y la demanda evaporativa sobre la máxima contracción, mientras que el MXTD es mayormente afectado por el proceso de rehidratación, que depende principalmente del suministro de agua del suelo y sólo de manera indirecta de la demanda evaporativa de la jornada anterior

Por otro lado la medición continua del diámetro del tronco nos permite observar de manera global como se comporta el crecimiento del árbol a lo largo de todo un periodo.

En la Figura 11 se ha representado la variación en continuo del diámetro máximo del tronco en los dendrómetros citados para los tres años estudiados. Como es lógico, en el intervalo de tiempo en que los árboles son regados sin limitaciones (hasta finales del mes de Junio) la pendiente de ambas curvas es muy similar. Pero al inicio de la parada vegetativa estival, cuando comienzan a aplicarse riegos diferentes también se hacen diferentes las pendientes del crecimiento.

Mientras el Control (plenamente regado) sigue creciendo de manera muy suave o permanece estable, el tratamiento Dendro detiene antes su crecimiento e incluso decrece de forma estimable hasta finales de Agosto. Al llegar a Septiembre y una vez que los riegos se reanudan según la ETc, se observa una pequeña recuperación del diámetro del tronco, que es mayor en Dendro que en Control. Por último en el mes de Octubre, se puede observar un nuevo descenso del diámetro del tronco cuando comienza la maduración del fruto, que en todos los casos es más acusada en el tratamiento Dendro que en el Control en todos los años de la experiencia.

Este efecto del estrés hídrico sobre el diámetro máximo de tronco ya fue observado por Moriana y Fereres (2002), que estudiaron el efecto del RDC en olivos jóvenes, primero en el mes de Junio y posteriormente durante la parada vegetativa estival. En ambos casos el diámetro máximo de tronco fue el primer parámetro que detectó el estrés hídrico del árbol, concluyendo que el crecimiento del tronco medido como la diferencia entre dos diámetros máximos diarios era el índice más sensible para medir el déficit hídrico. Así mismo Fernández et al. (2011a) y Cuevas et al. (2013), concluyeron que la evolución del MXTD fue útil para indicar la aparición y la gravedad del estrés hídrico, en sendos ensayos con dos niveles de riego deficitario controlado en el periodo del endurecimiento del hueso.

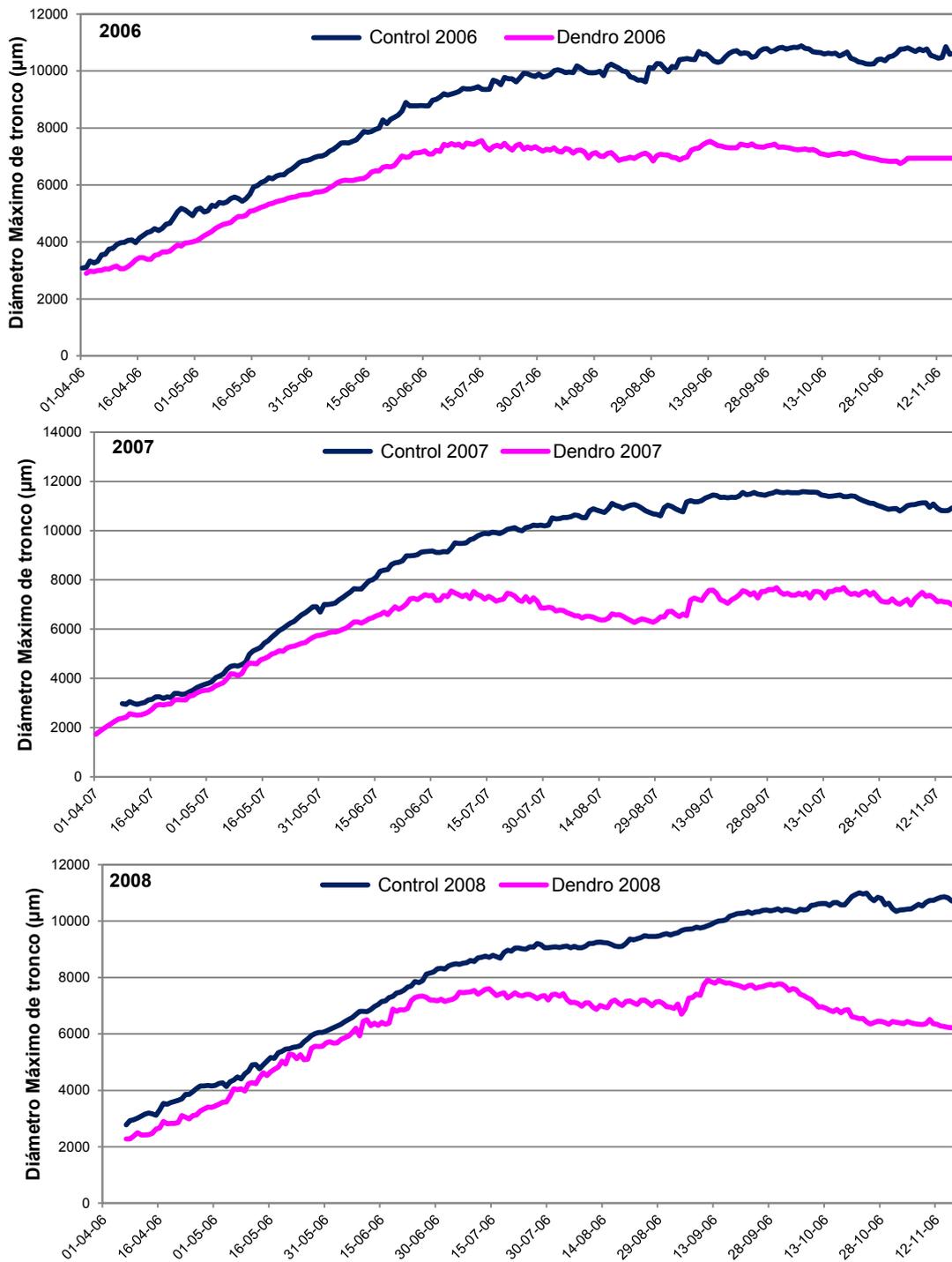


Figura 9. Evolución del diámetro máximo de tronco en el tratamiento Control y Dendro a los largo de la campaña de riego, para los tres años de la experiencia.

En la Figura 10 se observa el detalle de lo que ocurre en el mes de Julio y Agosto en el año 2006 tanto para el tratamiento Dendro como para el Control y se relaciona con el estado de humedad del suelo debido a los riegos y precipitaciones durante ese periodo.

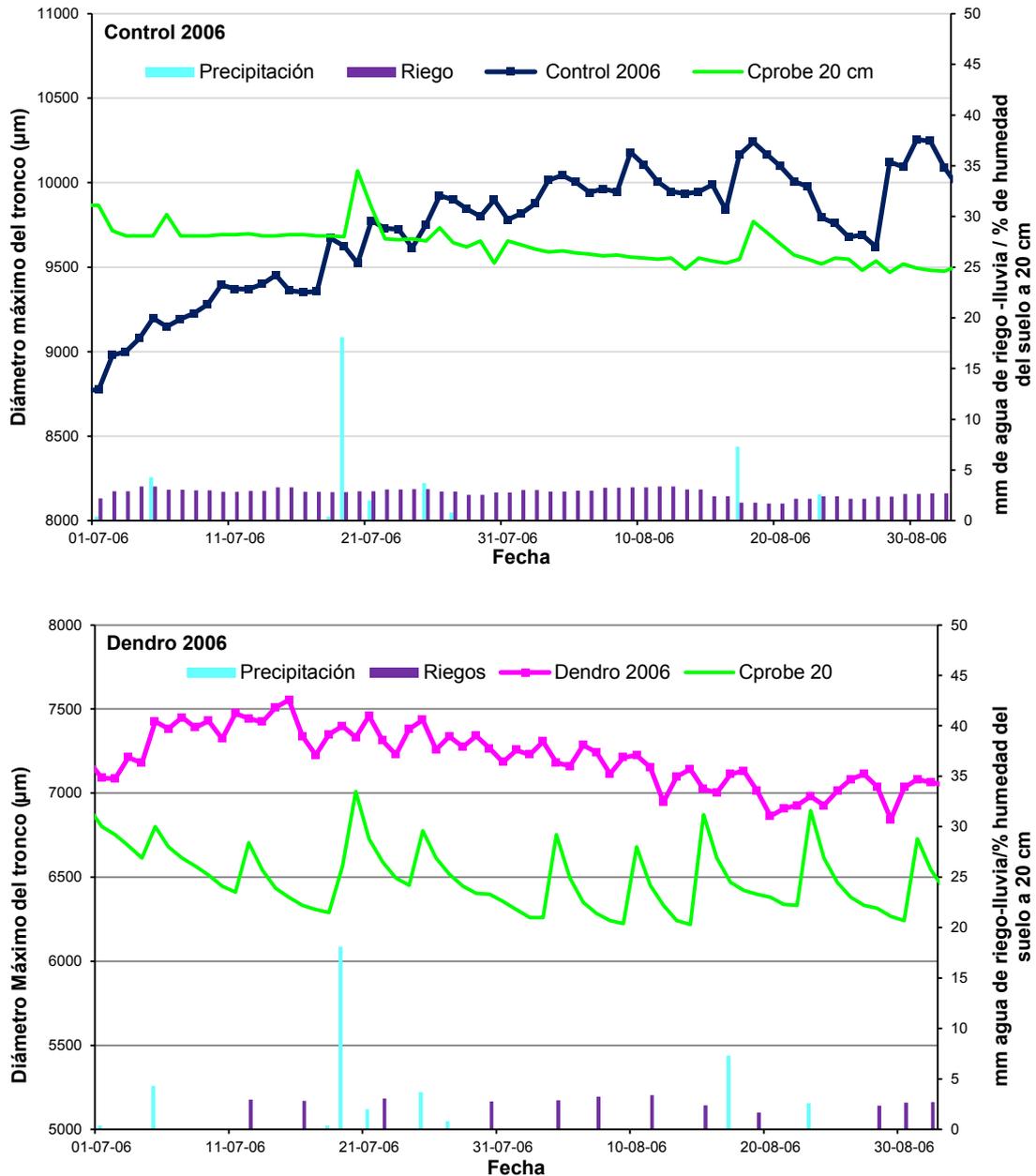


Figura 10. Detalle de la evolución del diámetro máximo de tronco (μ) y de la humedad volumétrica del suelo (%) a 20 cm en los tratamientos Control y Dendro del Año 2006. Las barras verticales representan los riegos aplicados a cada tratamiento y lluvia durante el periodo de parada vegetativa.

Como se puede observar hay una respuesta nítida de la humedad del suelo a 20 cm a los riegos y precipitaciones. En el caso del Control la humedad permanece

constante en un nivel próximo al 28 % de humedad, al comienzo del periodo de parada vegetativa. Solo encontramos algún pico de humedad correspondiente a las lluvias puntuales, y únicamente existe un ligero descenso de humedad en el suelo hasta el 25% al final del periodo donde el árbol tiene una mayor demanda ya que comienza el proceso de crecimiento de fruto.

Como ya se ha comentado el crecimiento del diámetro de tronco se ralentiza, y en el caso del Control no se detiene hasta el mes de Agosto.

Por el contrario en el tratamiento Dendro la tendencia del crecimiento del árbol es decreciente a lo largo del periodo. Al igual que en el Control diariamente se observan oscilaciones, aunque en el caso del Dendro dibujan una figura en dientes de sierra con una pendiente descendiente. El árbol tiende a decrecer cuando le falta humedad en el suelo, pero cuando se repone por medio de un riego o lluvia, el diámetro del tronco tiene una pequeña y aprovecha para almacenar agua en sus tejidos. Si la humedad del suelo vuelve a disminuir, el árbol utiliza esta agua almacenada y disminuye de nuevo el diámetro del tronco.

Al inicio del periodo de riegos (Julio) estas oscilaciones se compensan y dan como resultante una pendiente de 0, es decir no hay crecimiento neto. Pero a partir de la última semana de Julio la pendiente se hace negativa, lo que indica que el árbol no llega a recuperar totalmente el diámetro que tenía el día anterior. Esta fase coincide con el descenso del contenido medio de humedad del suelo a 20 cm.

De forma global se puede decir que durante la parada vegetativa estival, los riegos realizados como respuesta a pequeños descensos de crecimiento diario no han sido suficientes para evitar un decrecimiento del diámetro máximo del árbol. Hay que esperar a la reposición de los riegos según la ETc para recuperar totalmente el diámetro inicial.

3.2.2 Altura del árbol

La Figura 11, Figura 12 y Figura 13 muestran la evolución del crecimiento medio de la altura del árbol medido en los distintos estados fenológicos en los tres años de ensayo.

Como se observa en las tres figuras este comportamiento difiere entre tratamientos, pero a su vez es muy distinto de un año a otro.

En el año 2006 partimos de árboles en su quinto año de plantación, y que habían recibido los mismos riegos sin ningún tipo de restricción en ninguna de las parcelas. El año 2006 es el primer año en el que se aplican los riegos diferenciales en las parcelas de ensayo.

Como se observa en la Figura 11 los árboles crecen rápidamente durante las fases I a III, es decir desde la brotación hasta unas cinco semanas desde cuajado de frutos. A partir de ahí en la fase de IV, endurecimiento del hueso, el crecimiento se ralentiza, para después haber un segundo crecimiento vegetativo antes de la recolección.

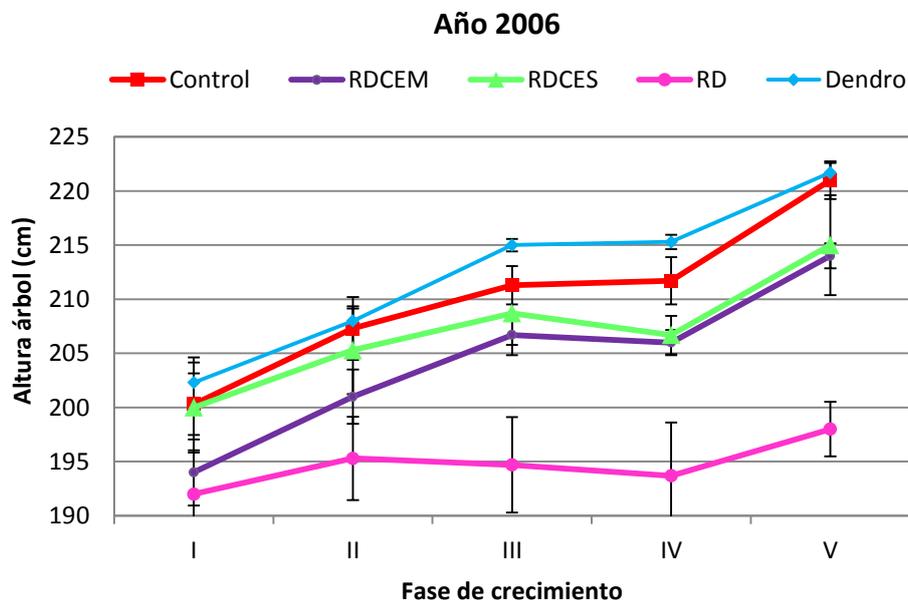


Figura 11. Evolución de la altura de los olivos (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2006. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.

Este primer año de ensayo todos los tratamientos se comportan de forma similar, aunque es destacable que el tratamiento RD comienza la ralentización de su crecimiento (incluso decrecimiento) ya en la fase II. Su crecimiento relativo durante toda la estación de riego resultó ser mucho más bajo que el resto de los tratamientos.

Tras la primera campaña de riego deficitario el tratamiento RD solo tiene un crecimiento relativo del 3,1 %, seguido del RDCES con un 7,5 %, y con valores similares los otros 3 tratamientos con crecimientos relativos en torno al 10%.

La Tabla 16 muestra que no existen diferencias significativas entre las distintas estrategias de riego si hablamos de crecimientos relativos. Por el contrario, sí encontramos diferencias significativas respecto al crecimiento entre el tratamiento RD y el resto de tratamientos de riegos aplicados desde el inicio de la campaña de riego hasta el final de la misma (Figura 11. Evolución de la altura de los olivos (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2006. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico. Figura 11).

Tabla 16. Crecimiento absoluto en altura de árbol (cm) durante la campaña de riego en el año 2006 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Año 2006			
	Crecimiento absoluto (cm)		Crecimiento relativo (%)	
Control	20,7±3,5	a	10,3±1,9	a
RDCEM	20,0±2	a	10,3±1,2	a
RDCES	15,0±3,5	ab	7,5±1,7	a
RD	6,0±1,5	b	3,1±0,9	a
Dentro	19,3±19,3	a	9,6±1,5	a

En el año 2007 la situación cambia, ya que no se parte de árboles de la misma envergadura ni con el mismo historial hídrico, por lo que la respuesta es distinta para todos los tratamientos (Figura 12).

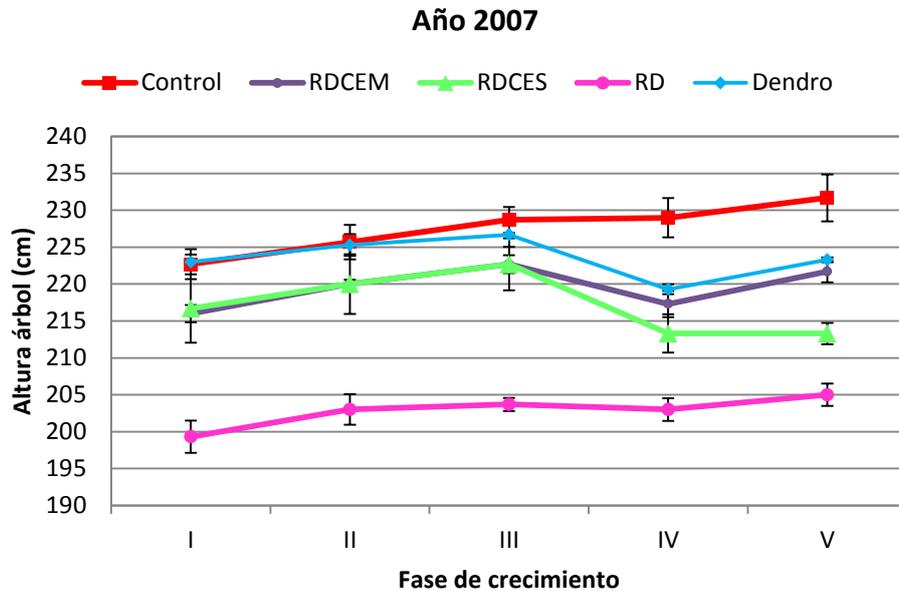


Figura 12. Evolución de la altura de los olivos (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2007. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.

Al igual que ocurría en el año 2006 el crecimiento general sigue la misma pauta, pero en este año los tratamientos con riego deficitario en el periodo fase III-fase IV, sufren un decrecimiento, para luego volver a recuperarse en la última fase cuando se restablece el riego y se iguala con el Control. La excepción a este fenómeno es, de nuevo, el RD, que tienen un crecimiento a lo largo de todo el periodo mucho más contenido.

Este año la restitución del riego al 100% de la ETC, es suficiente para detener el decrecimiento pero no supone en ningún caso la recuperación de la altura que el árbol había alcanzado en la fase III. Se puede observar, además que esta recuperación es mínima en el caso del RDCES, cuyo decrecimiento en la fase de riego deficitario fue más pronunciado.

En el caso del RD, lo que se observa es que el crecimiento a lo largo de toda la estación es mucho menor que en cualquiera de los otros tratamientos, y a su vez estable a lo largo de toda la estación de riego.

Como se observa en la Tabla 17, los incrementos relativos de crecimiento fueron mucho menores en 2007 que en 2006.

Tabla 17. Crecimiento absoluto en altura de árbol (cm) durante la campaña de riego en el año 2007 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Año 2007			
	Crecimiento absoluto (cm)		Crecimiento relativo (%)	
Control	9±2,1	a	4,0±0,9	a
RDCEM	5,7±0,3	ab	2,6±0,1	ab
RDCES	-3,3±3,2	c	-1,5±1,4	c
RD	5,7±0,7	ab	2,8±0,4	ab
Dendro	0,3±0,7	bc	0,1±0,3	bc

El crecimiento relativo al final de la segunda campaña de riego ha resultado ser negativo para el RDCES, y próximo al 0% de crecimiento para el caso del Dendro. Los tratamientos RD y RDCEM tienen un crecimiento relativo final muy similar del 2,8 y 2,6 % respectivamente. Por último, la estrategia Control alcanza el 4%, muy superior a todos los tratamientos de riego pero considerablemente menor al alcanzado en 2006 del 10,3 %.

A este respecto podríamos suponer que durante el año 2007, (que ha sido especialmente seco), el árbol ha seguido una estrategia de contención de crecimiento vegetativo invirtiendo sus reservas en otros aspectos más importantes como son la producción y la inducción e iniciación floral para el año siguiente.

El tratamiento RD ha desarrollado una buena adaptación a su situación de mayor estrés hídrico durante toda la campaña. No ha sufrido en ningún momento una “explosión” de crecimiento vegetativo, sino un crecimiento continuado y más contenido que en el resto de los tratamientos, lo que al final se ha traducido en un mayor crecimiento absoluto y también relativo que el resto de los tratamientos de riego deficitario.

El año 2008 es muy similar al año 2007. En este caso partimos de árboles cuya altura inicial tienen diferencias significativas al 95% entre todos los tratamientos a excepción de los tratamientos RDCEM y Dendro que parten de una altura media similar. Como ocurría en el año 2007, todos los tratamientos sufren un decrecimiento en el periodo fase III-fase IV, para recuperarse en la última fase (Figura 13).

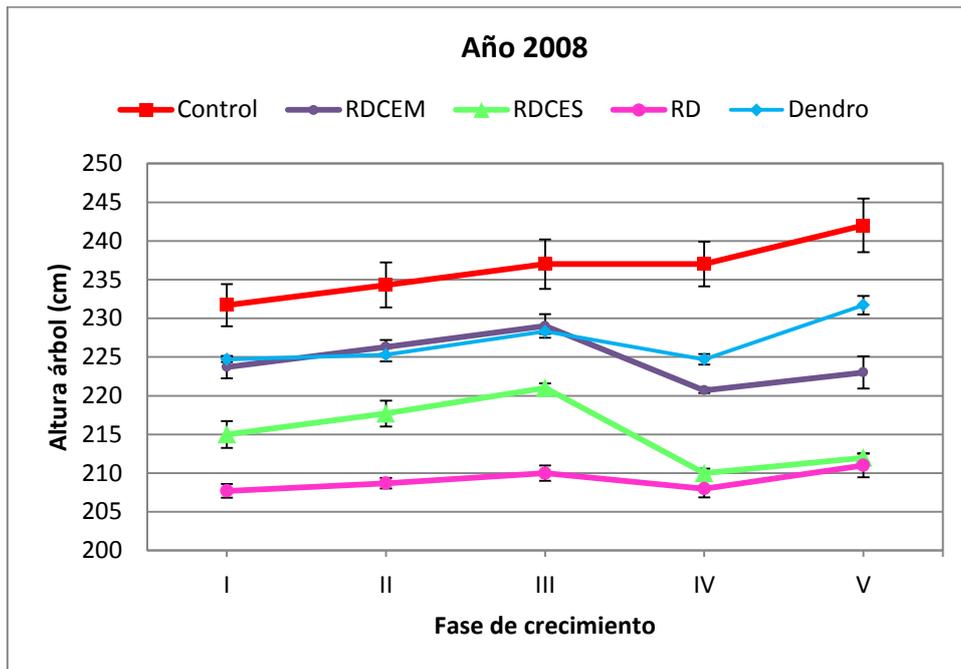


Figura 13. Evolución de la altura de los olivos (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2008. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.

Al igual que en el año 2007, el tratamiento RD es el que menos fluctuaciones presenta a lo largo de toda la estación de riego, sufriendo un ligero decrecimiento en la fase de endurecimiento del hueso, para luego recuperarse.

Los incrementos de altura y los crecimientos relativos del año 2008 se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Crecimiento absoluto en altura de árbol (cm) durante la campaña de riego en el año 2008 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Año 2008			
	Crecimiento absoluto (cm)		Crecimiento relativo (%)	
Control	10,3±1,2	a	4,5±0,5	a
RDCEM	-0,7±0,3	cd	-0,3±0,3	cd
RDCES	-3,0±3,2	d	-1,4±0,5	d
RD	3,3±0,7	bc	1,6±1,2	bc
Dendro	7,0±0,7	ab	3,1±0,7	ab

De nuevo el RDCES es el más afectado por el riego diferencial, sufriendo el mayor decrecimiento y sin llegar a recuperarse en la última fase de crecimiento, al igual que el RDCEM pero en menor medida. Y por último, en este año, sí que el

Dentro tras su decrecimiento vuelve a recuperarse totalmente como se puede ver en la Tabla 18, teniendo un crecimiento relativo al final de la estación de riego del 3,1 % muy cercano al control que fue del 4,5 %, a pesar de que el agua aplicada en este tratamiento fue muy similar a la aplicada en el RDCES.

En la Figura 14 se ha representado el crecimiento medio de los árboles durante los tres años de estudio.

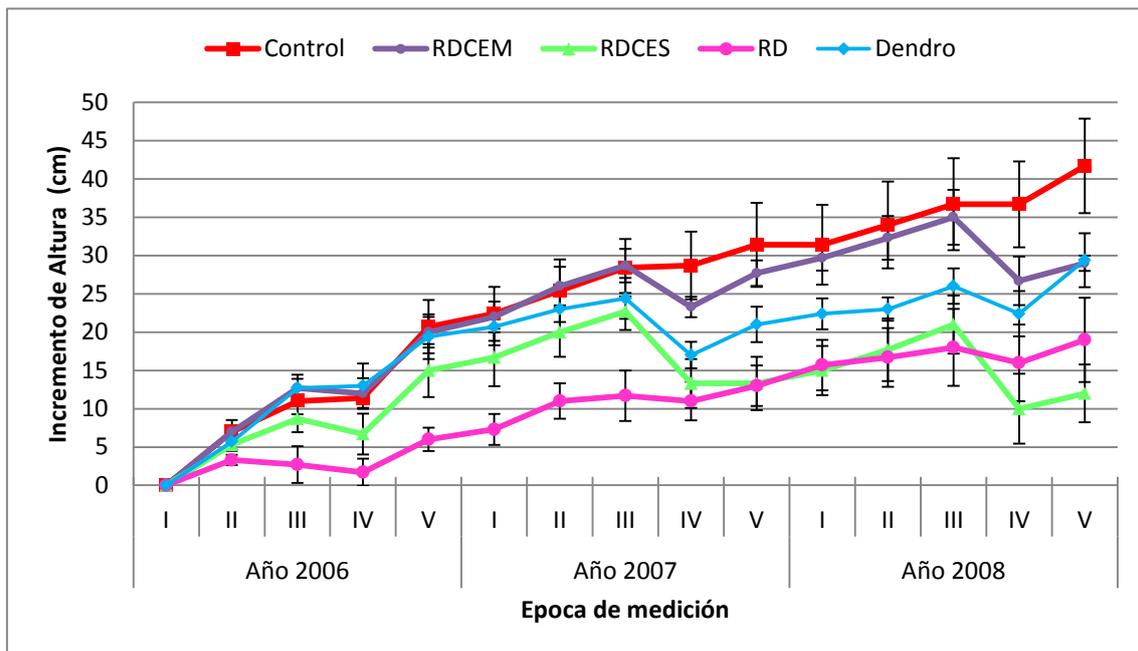


Figura 14. Crecimiento medio en altura de los olivos (cm) de los diferentes tratamientos de riego durante los tres años de experiencia. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.

Como se puede observar en la Figura 14, los tratamientos Control y RDCEM tienen un comportamiento similar los años 2006 y 2007 y 2008, siempre con la salvedad del periodo de riego diferencial en el que el crecimiento desciende en el caso del tratamiento de riego deficitario, pero posteriormente una vez reanudado el riego el árbol reacciona y se produce una recuperación del crecimiento.

En el caso del Dendro sucede algo similar, aunque el crecimiento relativo es menor en el segundo año. Esto podría explicarse porque el verano del 2007 las lluvias en los meses de Julio y Agosto fueron muy escasas, a diferencia de los años 2006 y 2008, lo cual ha podido contribuir a que los árboles hayan sufrido un mayor estrés en

2007, y el árbol ha priorizado en la traslocación de las reservas al mantenimiento de la fructificación y no tanto al crecimiento vegetativo.

En el caso de RDCES, lo que se observa es que el crecimiento medio de los árboles ha sido menor que el resto de los tratamientos. Se observa un decrecimiento más acusado en los momentos en los que se aplica el riego deficitario severo, y cuando se reanuda el riego, parece que el árbol no tiene tanta capacidad de recuperación como con el riego deficitario moderado o con el riego Dendro.

En el caso del RD continuado lo que se observa es que después del primer año (cuando el efecto del riego deficitario fue mayor), en los años posteriores la curva de crecimiento es similar a la del Control pero de menor pendiente, con incrementos mucho menores. Esto podría indicar que el árbol se adapta a las condiciones hídricas y contiene su crecimiento a lo largo de los sucesivos años, teniendo una evolución similar al Control pero con menor pendiente. Estos resultados son similares a los obtenidos por Girona (2001) que en un ensayo con 7 niveles de RD sobre una plantación joven de olivos, observó que a medida que aumentaba el riego aplicado, aumentaba el crecimiento del árbol, pero manteniéndose el mismo tipo de curva de crecimiento en todos los casos.

3.2.3 Diámetro del tronco

Simultáneamente a las medidas de altura del árbol se realizaron mediciones de la evolución del diámetro del tronco a lo largo de la estación de riego durante los tres años de ensayo.

La respuesta vegetativa del árbol en cuanto a sus variaciones en el diámetro de tronco fue menos evidente. Así pues, como se observa en la Figura 15, todos los tratamientos tienen una pauta de crecimiento muy similar durante toda la estación de riego, no habiendo diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las fases de crecimiento. Únicamente en la fase IV, se observa un decrecimiento más marcado en el tratamiento RDCES, con una diferencia significativa ($P=0,05$) respecto al resto de tratamientos. Este descenso de crecimiento denota que el agua aplicada no es suficiente y el árbol tiene que tirar de sus reservas produciéndose una disminución del diámetro del tronco. Este efecto también se observa en los tratamientos de RDCEM y RD, pero en menor medida, y en el caso de tratamiento Dendro el crecimiento cesa.

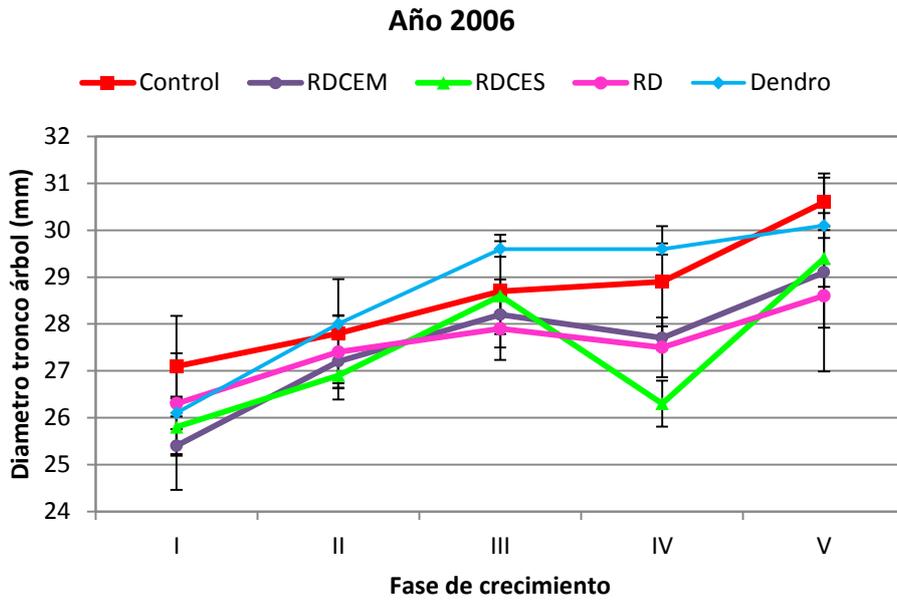


Figura 15. Evolución del diámetro medio del tronco (mm) de los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2006. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.

Una vez se reanuda el riego todos los tratamientos se recuperan, incluso el RD. Todas las estrategias terminan con un diámetro similar y sin que existan diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

Si observamos para el año 2006, el crecimiento absoluto y relativo del diámetro del tronco (Tabla 19), no presenta diferencias significativas, siendo prácticamente el mismo en todos los tratamientos a excepción del RD donde el crecimiento ha sido un 36 % menos que el del Control.

Tabla 19. Crecimiento absoluto del diámetro del tronco (mm) durante la campaña de riego en el año 2006 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a P<0,05.

Tratamiento	Año 2006	
	Crecimiento absoluto Ø de tronco (mm)	Crecimiento relativo Ø de tronco (%)
Control	3,6±0,7	13,2±2,8
RDCEM	3,8±1,4	14,8±5,4
RDCES	3,6±0,7	14,1±2,7
RD	2,3±0,4	8,6±1,9
Dendro	4,0±0,6	15,5±2,4

Todos los tratamientos han aumentado el diámetro de tronco por encima del 13% a excepción del RD que no llega al 9%, siendo el tratamiento Dendro el que mayor crecimiento experimenta con un 15,5 %.

En el año 2007, la situación es similar al año 2006, es decir solo el tratamiento RDCES sufre un decrecimiento durante la fase de riego deficitario, aunque mucho menos acusada que en el 2006, para luego recuperarse al reanudarse el riego (Figura 16.)

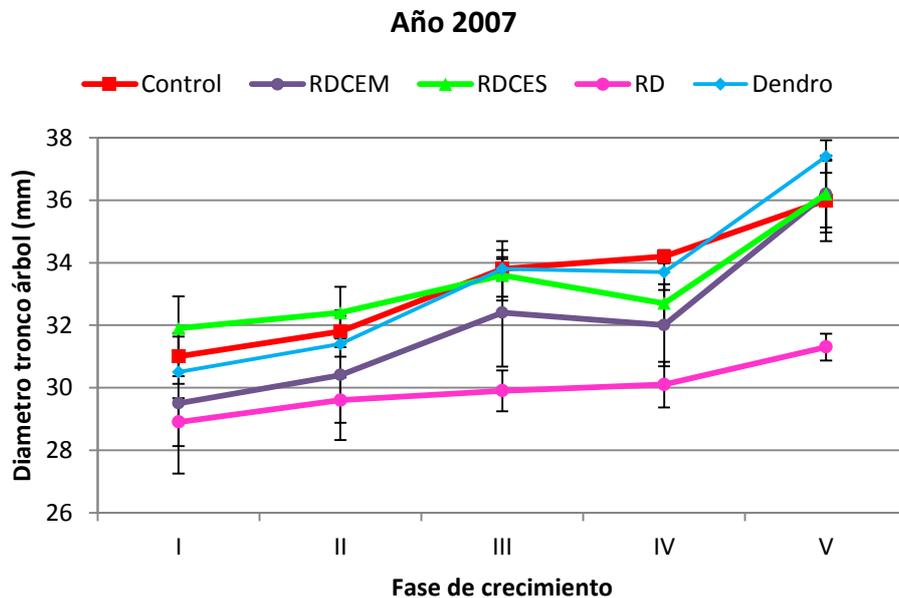


Figura 16. Evolución del diámetro medio del tronco (mm) de los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2007. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.

Este año lo más destacable es que después de dos estaciones consecutivas de riego deficitario los árboles del tratamiento RD comienzan a tener un menor crecimiento, de forma que su diámetro es unos 5 mm menor, teniendo diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

El crecimiento total del tratamiento RD fue un 50% menor que el Control, es decir su diámetro aumentó tan solo un 8% frente al 16% del Control (Tabla 20).

Tabla 20. Crecimiento absoluto del diámetro del tronco (mm) durante la campaña de riego en el año 2007 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Año 2007			
	Crecimiento absoluto Ø de tronco (mm)		Crecimiento relativo Ø de tronco (%)	
Control	5,0±1,7	a	16,0±5,8	a
RDCEM	6,7±1,0	a	22,8±5,3	a
RDCES	4,3±0,4	a	13,5±1,4	a
RD	2,3±0,6	b	8,1±2,2	b
Dendro	6,9±0,2	a	22,6±0,2	a

Por otro lado los tratamientos de RDCEM y Dendro tuvieron un mayor crecimiento que el Control después de toda la estación de riego. Tras el periodo de parada vegetativa, la reacción a la reanudación del riego al 100% de la ETc fue más patente en estos tratamientos, aunque sin diferencias significativas entre tratamientos, con la excepción del RD con el que si había diferencias significativas.

En el año 2008 se repite la pauta de crecimiento de tronco, aunque con un crecimiento más contenido (Figura 17). Todos los tratamientos aumentan el diámetro de una forma sostenida y prácticamente paralela hasta la fase III cuando el crecimiento se detiene e incluso decrece. Posteriormente reanudan el crecimiento durante la fase V, fase del segundo crecimiento vegetativo.

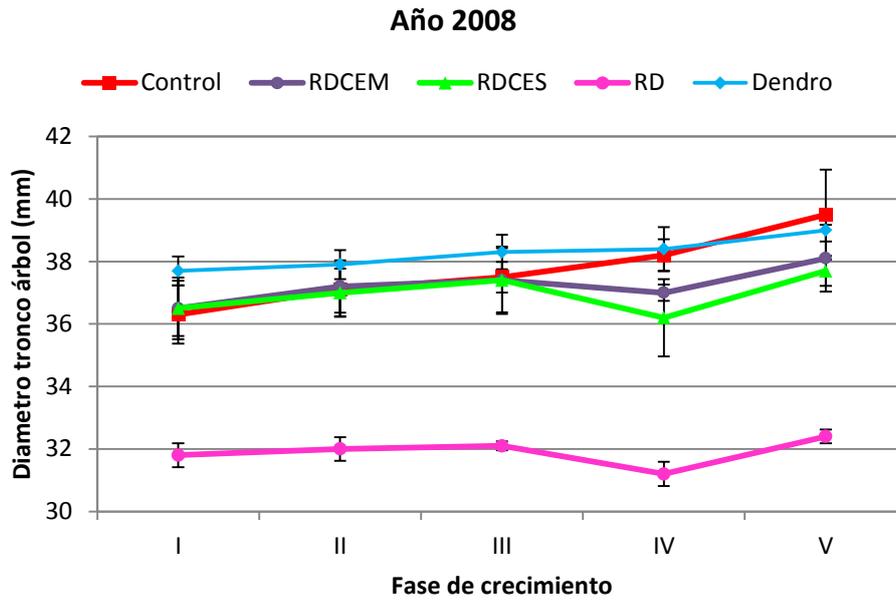


Figura 17. Evolución del diámetro medio del tronco (mm) de los distintos tratamientos de riego a lo largo de las fases de crecimiento en el año 2008. Los símbolos representan la media de los árboles de los tres bloques y los segmentos verticales representan el error típico.

Al igual que en los años precedentes este crecimiento fue del mismo orden de magnitud para todos los tratamientos a excepción del RD que es mucho menor y el Control que supera a todos los tratamientos de riego deficitario, como queda reflejado en la Tabla 21.

Tabla 21. Crecimiento absoluto del diámetro del tronco (mm) durante la campaña de riego en el año 2008 y crecimiento relativo (%). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Año 2008			
	Crecimiento absoluto Ø de tronco (mm)		Crecimiento relativo Ø de tronco (%)	
Control	3,2±1,4	a	8,9±4,4	a
RDCEM	1,6±1,1	a	4,3±3,1	a
RDCES	1,2±0,5	a	3,4±1,3	a
RD	0,6±0,2	b	1,8±0,7	b
Dendro	1,3±0,4	a	3,4±0,9	a

Se observa que el Control aumenta el diámetro en torno al 9%, frente al escaso 1,8 % del RD. En este sentido los tratamientos RDCES y el Dendro se comportan igual con un aumento del diámetro del 3,4 %, mientras que el tratamiento RDCEM es algo mayor llegando al 4,3 % pero todavía lejos de lo alcanzado por el Control.

El conjunto del crecimiento total del diámetro a lo largo de las tres campañas estudiadas se refleja en la Figura 18.

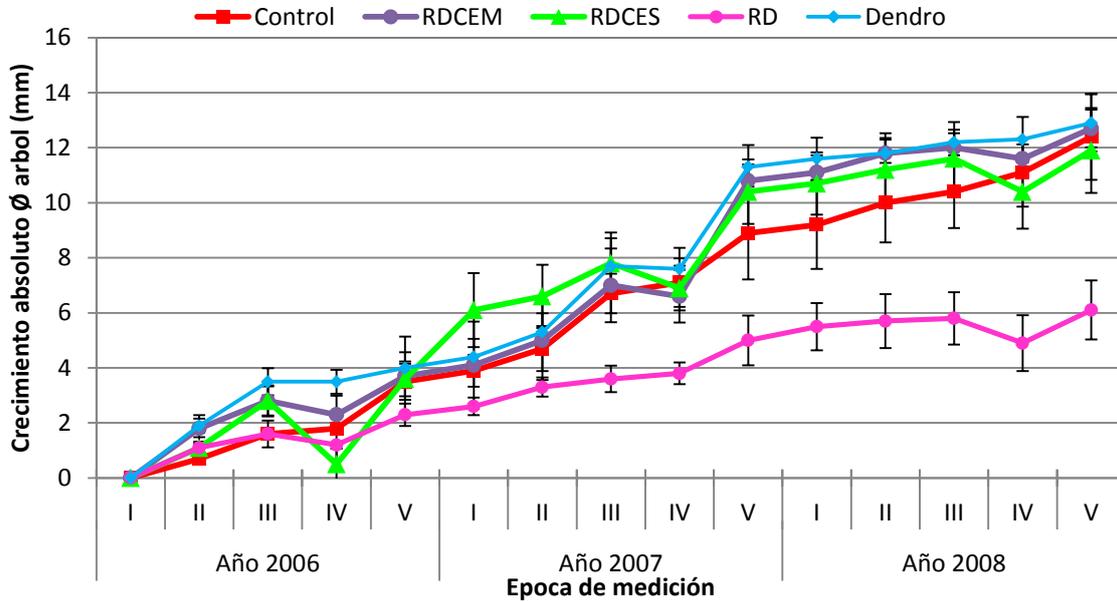


Figura 18. Crecimiento medio del diámetro (mm) de los olivos durante los tres años de experiencia en los distintos tratamientos de riego.

Si observamos el aumento del diámetro del tronco a lo largo de los tres años de estudio, se comprueba que el RD sostenido hace que el crecimiento sea mucho más lento. Por el contrario, el resto de las estrategias de riego aplicadas en la fase de parada vegetativa estival no afectaron al crecimiento normal del árbol, y no se han observado diferencias estadísticas entre ellas. El olivo, tras el estrés hídrico provocado en los meses de Julio y Agosto de los sucesivos años, ha sido capaz de recuperarse una vez reanudados los riegos, llegando a igualarse el diámetro del tronco al Control.

Por tanto, independientemente de la estrategia de riego los árboles crecen rápidamente durante las fases I a III. Entre III y la fase IV (endurecimiento del hueso) el crecimiento se detiene y al final del verano vuelve a haber un segundo crecimiento vegetativo. Esto parece responder a la adaptación del olivo al clima mediterráneo que hace que se cierren los estomas ante periodos de altas temperaturas y humedades bajas, para luego recuperarse rápidamente cuando las condiciones ambientales se suavizan.

Moriana et al. (2013), también encontraron un comportamiento similar en el crecimiento del diámetro del tronco en un ensayo con un RDC en la fase de endurecimiento del hueso, que se regaba solo cuando la Contracción Diaria era menor que un umbral prefijado por ellos. En estas condiciones se producía un decrecimiento del diámetro del tronco mayor que en el Control, llegando a haber diferencias significativas entre los tratamientos al final del periodo de RDC. Posteriormente, una vez reanudado el riego se recuperaba el crecimiento, sin que al final del verano existieran diferencias significativas con el Control (100% ETc).

Así pues, el olivo presenta una alta capacidad de recuperación del diámetro de tronco una vez se reanudan los riegos tras la parada vegetativa estival. Solo el tratamiento RD ha afectado al diámetro del tronco, de forma que a partir del segundo año de ensayo el diámetro no se recupera en la misma medida y presenta diferencias significativas con el resto de tratamientos.

3.2.4 Longitud de ramas laterales

El último parámetro de crecimiento vegetativo que se estudió fue el crecimiento de las ramas laterales. Este crecimiento es muy importante ya que en estas ramas se va a producir la diferenciación floral, la floración y fructificación de árbol. Es por ello que un buen desarrollo de las mismas supone afectar de manera positiva a los parámetros productivos del árbol.

En general la longitud de las ramas laterales sigue la misma pauta de crecimiento que la longitud total del árbol y que el tronco, es decir tiene un crecimiento rápido en las fases I a III, sufre una parada entre la fase III y IV (endurecimiento del hueso), y reanuda su crecimiento al final del verano (Septiembre).

La evolución de la longitud de las ramas laterales se puede ver en Figura 19.

El crecimiento de las ramas laterales fue muy parecido en todos los años ensayados, siguiendo una curva de crecimiento similar a la del Control. Únicamente el tratamiento RD muestra un menor crecimiento tras la parada vegetativa del verano. Esta diferencia ya se comienza a notar en el año 2006, en el que ya hay diferencias significativas al final del periodo de riego. En el año 2007 estas diferencias son mucho más pronunciadas, apareciendo ya en la fase III de crecimiento y repitiéndose este hecho en el año 2008 (Figura 19). Esto parece indicar que un riego deficitario

sostenido a lo largo de todo el año afecta al normal desarrollo de las ramas, produciendo un crecimiento más contenido a lo largo de todo el año.

Esto coincide con lo descrito por Grattan et al. (2006) quienes comprobaron en su experiencia que varios Riegos deficitarios por debajo del 75% de la ETc a lo largo de todo el año disminuía el crecimiento vegetativo, de forma que este crecimiento era mucho menor conforme disminuía el riego. Observaron cómo el crecimiento de las ramas con un riego del 75% ETc era la mitad del alcanzado por un tratamiento del 93% ETc o superiores, y que los tratamientos con riegos por debajo del 33% ETc solo crecieron un 25% de lo que lo hicieron los más regados.

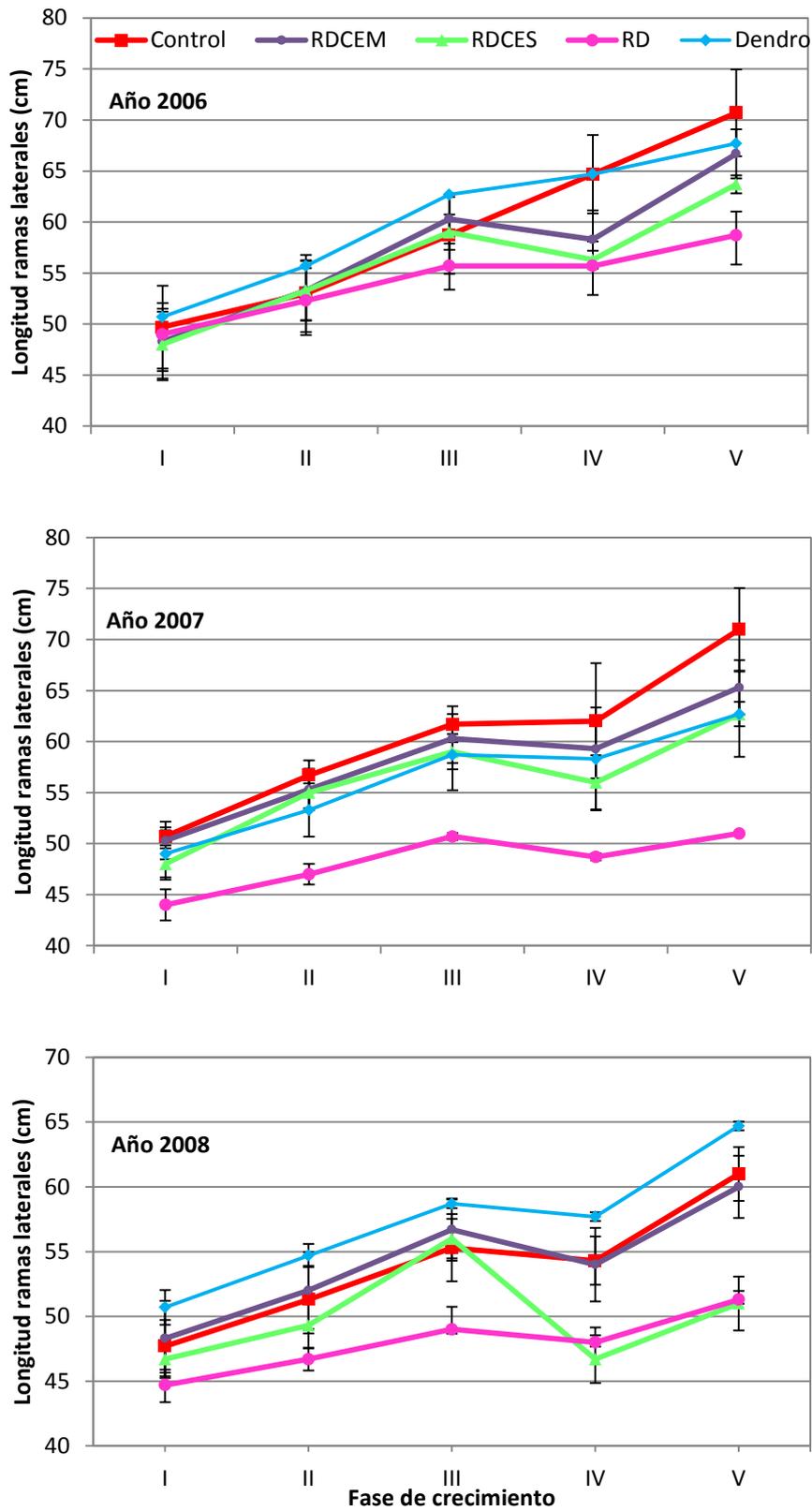


Figura 19. Evolución del crecimiento medio de ramas laterales (cm) en los distintos tratamientos de riego a lo largo de las distintas fases de crecimiento en los años 2006, 2007 y 2008.

El resto de los tratamientos se comportan de manera similar. La estrategia RDCES parece la más afectada por la limitación de agua y al final de la campaña tiene una longitud de las ramas laterales menor que las demás, pero estas diferencias han resultado ser no significativas desde el punto de vista estadístico con el resto de tratamientos de riego deficitario controlados (RDCEM y Dendro) y con el Control, a excepción del año 2008 que sí que tiene diferencias significativas con los tratamientos RDCEM, Dendro y Control.

Cuevas et al. (2013), encontraron resultados similares en un ensayo con dos niveles de RDC (60% ETc y 30% ETc) en el periodo de endurecimiento del hueso de forma que el crecimiento de las ramas laterales se vio muy ralentizado, incluso se detuvo durante el periodo de RDC frente a un crecimiento continuado del Control (100%ETc). Una vez reanudado el riego en Septiembre los brotes tuvieron un tasa de crecimiento similar al Control en el caso del tratamiento menos estresado (60% ETc), pero no así en el tratamiento de mayor estrés (30% ETc).

El crecimiento absoluto de las ramas laterales a lo largo de la estación de riego ha sido estudiado en la Tabla 22.

Tabla 22. Crecimiento absoluto de las ramas laterales (cm) y crecimiento relativo (%) durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008).Diferentes letras representan una diferencia significativa a P<0,05.

Tratamiento	Crecimiento ramas laterales (cm)			
	2006		2007	2008
Control	21,0±1,0	a	20,3±4,9	13,3±0,7 a
RDCEM	18,3±0,7	ab	15,0±2,6	11,7±0,7 a
RDCES	15,7±3,8	b	14,7±2,4	4,3±0,7 b
RD	9,7±0,9	c	7,0±1,5	6,7±0,9 b
Dendro	17,0±1,5	ab	13,7±2,6	14,0±1,5 a

El crecimiento absoluto de las ramas laterales ha resultado ser menor en el tratamiento RD con respecto al resto de los tratamientos y esta diferencia ha resultado ser significativa desde el punto de vista estadístico, con la excepción del año 2007, a pesar de tener un crecimiento medio de tan solo 7 cm frente a los 20 cm del Control, y a los 14 cm del resto de los tratamientos.

3.2.5 Efectos globales de las estrategias de riego sobre los parámetros vegetativos

Se ha podido comprobar a lo largo de los tres años de nuestra experiencia que la intensidad de la parada vegetativa y su posterior recuperación se ven afectadas por el manejo del agua, independientemente del parámetro del que hablemos.

El efecto de las distintas estrategias de riego sobre el crecimiento durante el verano es mayor en los tratamientos RD, RDCE y menor en los tratamientos Dendro y RDCEM. En algunas ocasiones incluso se pueden observar decrecimientos del árbol o de las ramas que achacamos al efecto negativo en el mantenimiento de la turgencia en el momento de la medida, efecto no observado en el Control.

En el tratamiento RD se observa una fuerte disminución de la tasa de crecimiento en altura, en el diámetro del tronco y en la longitud de las ramas laterales, que se produce desde el primer año. Esta observación coincide con los resultados obtenidos por Iniesta et al. (2009) y Moriana et al. (2003) para cultivos extensivos de olivo y parece indicar que el déficit sostenido afecta negativamente al crecimiento, lo que podría ser interesante para controlar el vigor en este tipo de plantaciones. Resultados similares encontró Palese et al. (2010) en un cultivo intensivo de olivo cv Coratina, donde el crecimiento de los brotes se redujo en un 81% bajo condiciones de secano frente al cultivo regado según la ETc.

También RDCES muestra una menor altura del árbol y una menor longitud de las ramas laterales pero los datos no son tan evidentes en el transcurso del primer año. En este caso además, el diámetro del tronco es estadísticamente superior al tratamiento RD. Los tratamientos CTL, RDCEM y Dendro son los que mayor altura, mayor diámetro del tronco y mayor longitud de las ramas laterales alcanzan, sin que existan diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Por tanto el olivo muestra una alta capacidad de recuperación una vez se reanudan los riegos tras un RDC moderado.

La estrategia de RD conduce a un menor crecimiento del árbol, del tronco y de los brotes. La estrategia Dendro se comporta significativamente igual al Control.

En situación intermedia se coloca riego deficitario controlado, con ligeras diferencias entre las dos estrategias ensayadas: el déficit moderado obtiene árboles más altos y con brotes más largos que el déficit severo.

Para evitar las diferencias que pudieran deberse a situaciones de partida diferentes, se ha calculado el crecimiento acumulado en los tres años de la experiencia para los valores de la altura del árbol, el perímetro del tronco y la longitud de los brotes (Tabla 23) y los resultados son similares a los anteriores.

Tabla 23. Crecimiento acumulado al final de la experiencia en cuanto a altura del árbol (cm), diámetro de tronco (mm) y crecimiento medio de ramas laterales (cm). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Crecimiento acumulado 2006-2008					
	Altura árbol		Perímetro tronco		Ramas laterales (*)	
Control	41,7±6,2	a	12,4±1,6	a	18,2±1,6	a
RDCEM	29,0±1,0	a b	12,7±0,7	a	15±0,9	a b
RDCES	12,0±3,8	c	11,9±1,5	a	11,6±1,9	b c
RD	19,0±5,5	b c	6,0±1,1	b	7,8±0,6	c
Dendro	29,3±3,5	a b	12,9±1,0	a	14,9±1,4	a b

(*) Promedio de los 3 años

Los tratamientos Dendro y RDCEM no afectan a la altura del árbol con respecto al Control. Por el contrario, los árboles de las estrategias RD y RDCES crecen significativamente por debajo de los anteriores tras 3 años de ensayo.

Sin embargo, las estrategias de riego no han mostrado diferencias en cuanto al grosor alcanzado por el tronco al final de las tres campañas. Sólo el RD ha mostrado un crecimiento significativamente menor al final de la experiencia. Moriana et al. (2000) encuentran los mismos resultados: el crecimiento del tronco no se ve afectado por riegos deficitarios controlados, ya que una vez que se reanudan los riegos, el árbol tiene una alta capacidad de recuperación.

Tampoco la restricción de agua en los periodos de endurecimiento del hueso parece afectar al crecimiento de los brotes si lo consideramos campaña a campaña. Melgar et al. (2008) obtienen resultados similares pero también comprueban que existe una tendencia: hay una mayor longitud de los brotes cuando se incrementa la cantidad de agua aplicada, aunque no es estadísticamente significativa más que 3 de los 9 años de sus experiencias. Sin embargo, si analizamos en nuestro caso el

crecimiento medio al final de la experiencia, Control obtiene los mayores crecimientos, seguido de Dendro y RDCEM, sin diferencias entre ellos. RDCES obtiene menores crecimientos promedio que los anteriores y por último, y con diferencias estadísticamente significativas, se encuentra el RD. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Grattan et al. (2006), quienes observaban menores crecimientos de las ramas cuando regaban con dosis inferiores al 75% de la ETc durante todo el ciclo vegetativo.

3.3 Respuesta de los parámetros productivos al riego deficitario

3.3.1 N° de Flores y frutos cuajados

Durante los tres años de la experiencia se contabilizaron el n° de flores y el n° de frutos cuajados en las mismas ramas marcadas en los árboles para determinar el crecimiento vegetativo.

El número de flores por brote en los 3 años de experiencia se reflejan en la Tabla 24.

Tabla 24. Número de flores por brote durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	N° flores/brote			
	2006	2007	2008	Promedio
Control	603±219	740±80 a	806±40 a	716 ab
RDCEM	553±49	756±36 a	715±64 a	675 ab
RDCES	616±218	564±46 ab	516±35 b	565 bc
RD	550±52	421±46 b	500±13 b	490 c
Dendro	733±172	762±62 a	718±22 a	738 a

En el año 2006 no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Este es el primer año de riego deficitario, por lo que el agua recibida por todos los tratamientos durante la inducción e iniciación floral fue la misma.

En el año 2007 todos los tratamientos han sufrido al menos una estación de riego deficitario a excepción del Control, lo cual podría explicar las diferencias existentes entre los tratamientos. Se ha podido constatar que Control, RDCEM y Dendro no presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellos, pero sí las

presentan con respecto a los tratamientos RDCES y RD, produciéndose un 35% menos nº de flores de éste último que en el Control.

En el año 2008, esta tendencia se repite haciéndose más patentes las diferencias entre los tratamientos con más estrés hídrico y el resto, y siempre manteniéndose con un mayor nº de flores el Control frente al resto, aunque sin diferencias significativas con los tratamientos Dendro y el RDCEM.

Las estrategias de riego Control, RDCEM y Dendro obtienen al final de la experiencia un mayor número de flores por brote en el promedio de los 3 años, sin que existan diferencias significativas entre ellos. Por el contrario, se puede observar que los tratamientos RD y RDCES tienen un menor número de flores por brote. El RD es el que menor nº de flores obtiene en el promedio de los años de la experiencia y en cada uno de los años individualmente, manteniendo diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

Haciendo el mismo estudio con el nº de frutos cuajados por brote observamos el mismo comportamiento. En el año 2006 no existen diferencias significativas entre ningún tratamiento. En el año 2007, se observa que en general disminuye el nº de frutos por brote en todos los tratamientos, siendo este descenso mucho más brusco en los tratamientos con estrés más severo. A pesar de que este descenso es del orden del 40% menos que en el Control, estas diferencias no llegan a ser significativas desde el punto de vista estadístico (Tabla 25).

Tabla 25. Número de frutos cuajados por brote durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Nº frutos cuajados/brote			
	2006	2007	2008	Promedio
Control	29,3±1,2	23,3±2,0	28,3±1,3 a	27,0 a
RDCEM	27,3±5,8	21,0±1,5	27,7±1,7 ab	25,3 ab
RDCES	26,3±3,9	14,3±1,2	22,0±1,5 b	20,9 bc
RD	29,3±3,3	13,7±1,2	13,3±0,9 c	18,8 c
Dendro	34,3±4,4	22,3±4,4	31,7±3,2 a	29,4 a

En 2008 el nº de frutos por brote aumenta en todos los tratamientos aunque de forma irregular, lo que hace que en este año sí que existan diferencias significativas entre algunas de las estrategias. En concreto, no existen diferencias significativas

entre el Control y los tratamientos Dendro y RDCEM, pero sí que las hay con los tratamientos RDCES y RD, siendo este último el que menor nº de frutos produce.

En este caso, estas variaciones de descenso y aumento en el nº de frutos entre un año y el siguiente dentro del mismo tratamiento, nos lleva a pensar que los fenómenos de vecería descritos para el olivo siguen presentes, aunque de forma atenuada en los casos de estrategias de riego menos severas (Control, Dendro y RDCEM), y más marcadas en los tratamientos más estresados (RDCES y RD).

Grattan et al. (2006) en un ensayo con siete niveles diferentes de RD que iban desde la aplicación del 15% ETc al 104% ETc (15%, 25%, 40%, 57%, 71%, 89%, 104%) concluyen que el nº de frutos por rama y la densidad de fructificación (nº de frutos /cm de rama) aumenta a medida que aumentaba el agua aplicada, obteniéndose los mejores resultados para los tratamientos con un riego superior al 71% ETc. , que tienen diferencias significativas con los tratamientos más estresados. Los tratamientos de menos riego (15%-57%) se comportan de forma similar habiendo diferencias significativas solo entre el tratamiento más estresado del 15% con el resto, que se comportan igual. Estos resultados se dieron en año de carga, mientras que en el año de descarga no se observaron diferencias significativas. Nuestra experiencia es similar respecto al tratamiento RD, que presenta diferencias significativas el año de carga (2008), mientras que en el año de descarga 2007, no presenta diferencias significativas con el resto de tratamientos aunque mantiene un menor número de frutos.

Para intentar minimizar el efecto de la vecería sobre el nº de frutos, se estudió el promedio de frutos en los tres años de ensayo. Desde este punto de vista se puede indicar que el Riego Deficitario (RD) tendría el mayor efecto negativo en la productividad media de cultivo, seguida de cerca por la estrategia de Riego Deficitario Controlado con Estrés Severo (RDCES).

Los resultados parecen indicar que los fenómenos de inducción floral que tienen lugar durante la fase de endurecimiento del hueso en la parada vegetativa estival no se ven afectados por los tratamientos en los que se usa el dendrómetro como referencia y en los que el estrés es moderado. Sin embargo, en el momento en que el estrés aumenta, el número de frutos del año siguiente se resiente, lo que confirmaría que un estrés severo sí influye en la inducción floral, y por tanto en la floración y fructificación del año siguiente. Esto explicaría los menores resultados del

RDCES. Por último, los datos parecen indicar que si el estrés continúa después de la fase de endurecimiento del hueso se verían afectados los fenómenos de iniciación floral, de modo que el tratamiento RD consigue los peores resultados.

Palese et al. (2010), en un cultivo intensivo de olivo cv Coratina, al comparar el efecto en la floración y fructificación en olivos regados y no regados concluyen que la disponibilidad de agua mejora el crecimiento vegetativo, como es el crecimiento de los brotes, permitiendo que el olivo produzca un mayor número de yemas que serán la base de fructificación al año siguiente. De forma que el crecimiento vegetativo en un año influye directamente en la producción del siguiente, efecto ya descrito por Iniesta et al. (2009) sobre olivos adultos y en plantaciones tradicionales. Así pues, si el déficit hídrico se produce en momentos sensibles al crecimiento vegetativo la producción se verá afectada de forma directa, por lo que hay que tener en cuenta esta circunstancia a la hora de programar y establecer el momento de aplicación de los RDC.

En nuestro caso la relación entre el número de flores y frutos y el crecimiento vegetativo de los brotes no se refleja de forma clara todos los años. Los frutos cuajados no parecen tener relación con las estrategias de riego en el año 2006 y 2007 (A pesar de que este descenso es del orden del 40% menos que en el Control, estas diferencias no llegan a ser significativas desde el punto de vista estadístico (Tabla 25).

Tabla 25).

Si estudiamos el número de flores y frutos respecto a la longitud de rama (Tabla 26), sólo en 2008 se separan los tratamientos. Dendro, Control y RDCEM obtienen un número de frutos por centímetro de rama superior estadísticamente al de los tratamientos RDCES y RD, siendo este último tratamiento el que menor número de frutos por centímetro de rama tiene.

Desde este punto de vista tendríamos que obviar la fructificación del año 2006, ya que el año anterior todos los tratamientos fueron regados de la misma forma, mientras que el año 2007 ya se observa un descenso en la floración significativamente diferente entre RD y RDCES y el resto de tratamientos y una menor fructificación en los tratamientos RD y RDCES, aunque en este caso sin diferencias significativas con Control, Dendro y RDCEM.

Tabla 26. . Numero de flores y frutos cuajados por cm de rama durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Nº flores/cm rama			Nº frutos/cm rama		
	2006	2007	2008	2006	2007	2008
Control	10,8±4,6	12±0,9 ab	14,7±1,4 a	0,46±0,0	0,39±0,1	0,52±0,0 ab
RDCEM	9,2±0,5	12,6±1,0 ab	12,6±1,0 ab	0,47±0,1	0,36±0,0	0,51±0,0 ab
RDCES	10,6±2,5	9,6±0,9 bc	9,2±0,8 b	0,47±0,1	0,26±0,0	0,41±0,0 b
RD	9,5±0,8	7,2±0,9 c	9,5±0,1 b	0,53±0,0	0,28±0,0	0,28±0,0 c
Dendro	14,3±3,3	14,2±1,8 a	14,2±0,4 a	0,53±0,1	0,38±0,0	0,55±0,1 a

En este sentido también hay que señalar que el olivo es un árbol que se caracteriza por tener una alternancia en la producción, existiendo años de baja producción (año de descarga) y años de alta producción (año de carga), fenómeno conocido como vecería. En este ensayo el 2008 fue un año de carga, mientras que el año de descarga fue el 2007, de forma que no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos este año, pero si el año de carga (2008), resultados que coinciden con los observados por Michelakis et al (1994) y Selles et al. (2006) quienes encontraron que en años de alta carga se caían menos frutos en árboles bien regados que en árboles sin riego, efecto que no sucedía en años de baja carga.

Se ha calculado, por último, la tasa de cuajado de los frutos como el nº de frutos cuajados por brote respecto al nº de flores por brotes en los 3 años de la experiencia (Tabla 27).

Tabla 27. Tasa de cuajado de frutos por brote (%) durante la tres campañas de riego estudiadas (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Tasa de cuajado (%)			
	2006	2007	2008	Promedio
Control	6,2±1,8	3,3±0,6	3,6±0,3	4,4
RDCEM	5±1,0	2,8±0,2	3,9±0,4	3,9
RDCES	4,7±1,3	2,6±0,4	4,3±0,4	3,9
RD	5,5±0,8	3,3±0,4	2,7±0,2	3,8
Dendro	5,2±1,3	3,1±0,9	4,4±0,5±	4,2

Estos resultados muestran que la tasa de cuajado no se ve alterada por las estrategias de riego, hecho observado ya por Grattan et al. (2006), lo que pondría de manifiesto que el cuajado de los frutos tiene que ver con otro tipo de parámetros y no con el riego aplicado.

Los datos indicarían que las diferencias del número de frutos no serían debidas a una mayor tasa de cuajado, sino a un mayor crecimiento vegetativo de los brotes fructíferos en las estrategias Control, RDCEM y Dendro. Como el crecimiento vegetativo de los brotes es mayor, al final se traduce en un mayor nº de frutos por brote.

3.3.2 Efectos globales de las estrategias de riego sobre los parámetros productivos

De las 5 estrategias, las que implican un moderado estrés y Dendro no afectaron al crecimiento de los brotes probablemente porque el crecimiento mayor ocurre durante la fase en la que no hay estrés. Sin embargo, el número de frutos por brote, y posiblemente la inducción floral se vieron negativamente afectado por los tratamientos de riego deficitario, no así la tasa de cuajado de frutos. Este efecto está mucho más marcado en los años de carga que en los de descarga.

3.4 Producción

3.4.1 Evolución del peso de 100 aceitunas. Índice de Madurez

La evolución en el tiempo del peso de los frutos no ha registrado variaciones significativas en los tres años. Las aceitunas permanecen iguales en tamaño después del cuajado independientemente de la estrategia de riego seguida, con la excepción de RD que es ligeramente inferior en los tres años estudiados.

Como se observa en la Figura 20, el crecimiento de los frutos desde Julio hasta mediados de Septiembre es muy pequeño. Sin embargo, se pueden observar diferencias, de forma que el tratamiento Control y Dendro tienen un mayor peso y con diferencias significativas respecto al resto de los tratamientos. Esto es debido a que el estrés hídrico en el mes de Julio afecta a la división celular en el fruto, y por tanto se forman frutos con menor número de células (Fereres y Orgaz, 1995), lo que afecta al tamaño del fruto.

Con la reanudación del riego se observa un crecimiento más acelerado del tamaño del fruto en los tratamientos más estresados de forma que a principios de Octubre todos los tratamientos han igualado el tamaño de sus frutos.

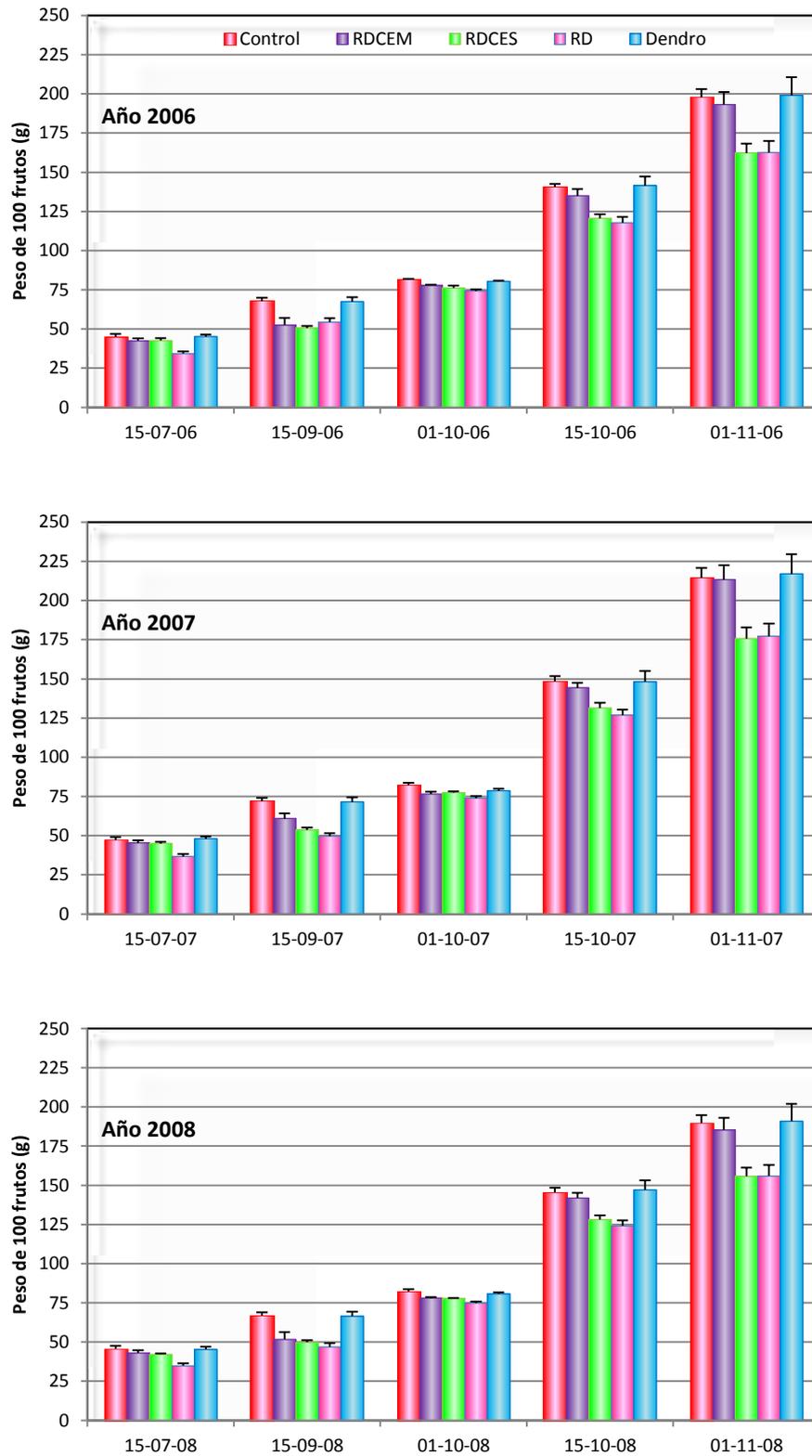


Figura 20. Evolución del peso de 100 frutos (g) desde el inicio de la parada vegetativa estival (mediados de Julio) hasta la cosecha (primeros de Noviembre), en los tres años de la experiencia, año 2006, 2007 y 2008. Los segmentos verticales representan el error típico.

A partir de ese momento y hasta la recolección se produce un segundo aumento del peso del fruto, que es de menor intensidad en el RD y en el RDCES.

Estos resultados coinciden con los de Iniesta et al (2009) quienes encontraban que sus tratamientos con déficit moderados (50% ETc) y severo (25% ETc) reducían el tamaño de los frutos frente al Control. También Tognetti et al (2006) estudiaron el efecto de diferentes niveles de déficit hídrico en la fase de endurecimiento del hueso (0% ETc, 33%ETc, 66% ETc, y 100% ETc) para dos variedades (Frantoio y Leccino) observando cómo todos los parámetros relacionados con la producción, a excepción del número de frutos, disminuían progresivamente conforme el aporte de agua era menor. Estos resultados coinciden con los nuestros para la variedad Arbequina, ya que también se observa una disminución del peso de 100 frutos progresivo conforme aumenta el déficit hídrico en la fase de endurecimiento del hueso (Control: 100% ETc; RDCEM: 50% ETc y RDCES: 25% ETc).

Las aceitunas del tratamiento RD siempre tienen menor peso, lo que parece indicar que el déficit continuado afecta negativamente al peso de los frutos desde el momento de su formación. Esto ya fue observado por Grattan et al. (2006) en un ensayo con 7 niveles de RD, donde el peso del fruto disminuía conforme el agua aplicada era menor, de forma que en su primer año de ensayo ya observaron como el peso de los frutos del tratamiento que recibió menos agua solo fue la mitad del peso del fruto del tratamiento más regado.

Por otro lado, los tratamientos RDCES y RDCEM aumentan menos el peso en la fase de crecimiento del fruto (mes de Septiembre) que Dendro y Control. Esto parece indicar que cualquiera que sea el nivel del estrés en esa fase afecta al crecimiento de las aceitunas, situación que se ha podido comprobar visualmente en nuestro caso ya que hemos observado pasificaciones del fruto para las tres estrategias deficitarias en algunos momentos puntuales. La diferencia parece que estriba en que el tratamiento RDCEM es capaz de recuperar el crecimiento en peso en los momentos previos a la cosecha cuando se restituye el riego, mientras que el RDCES no. Esto viene a corroborar lo visto por Cuevas et al. (2013) en un ensayo con dos niveles de RDC en los meses de Julio y Agosto y con RD a lo largo de la año. En su experiencia observaron una reducción del crecimiento del fruto en los meses del verano, que llegaba incluso al arrugamiento de las aceitunas en el tratamiento más estresado, para luego producirse un crecimiento acelerado una vez que se reponían los riegos. Este

crecimiento resultaba ser mayor en los tratamientos Control y RDC (60% ETc), al igual que en nuestros ensayos.

Por otro lado llama la atención como el tratamiento Dendro no afecta al desarrollo del fruto a pesar de que el agua aplicada en la parada vegetativa es similar al tratamiento de mayor estrés RDCES. Lo que nos lleva a pensar que sería mejor aplicar el agua de riego cuando el árbol esta estresado y lo manifiesta con algún tipo de “señal”, y no de una forma constante y en cantidades reducidas a lo largo de toda la parada vegetativa, ya que esta última estrategia parece que no ayuda a mantener un mejor estado hídrico del árbol.

Sin embargo, si observamos el peso seco de las aceitunas en el momento de la cosecha (Tabla 28), no encontramos apenas diferencias entre las distintas estrategias de riego, lo que indicaría que las diferencias obtenidas en la cosecha final son debidas a un diferente contenido de agua. Sólo el RD a lo largo de la campaña muestra menores pesos, lo que indicaría que las diferencias en este caso podrían estar producidas por una menor formación de células en el mesocarpo, posibilidad citada por Girona et al. (2001).

Tabla 28. Peso seco de 100 aceitunas (g) en el momento de la recolección en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Peso seco (g)					
	2006		2007		2008	
Control	102,1±5,3	a	110,3±6,4	a	98,4±5,1	a
RDCEM	102,3±8,0	a	110,4±9,3	a	98,4±7,7	a
RDCES	97,6±5,9	a	103,1±7,2	a	95,4±5,7	a
RD	81,5±7,4	b	88,3±8,0	b	78,6±7,1	b
Dendro	107,4±11,5	a	116,2±12,5	a	103,0±11,0	a

Así mismo, durante el mes de Octubre se determinó el Índice de Madurez sobre la muestra de 100 frutos recogidos para comprobar su evolución antes del momento de la recolección dependiendo de la estrategia de riego aplicada.

Esta evolución de la madurez durante el mes previo a la recolección se puede observar en la Figura 21.

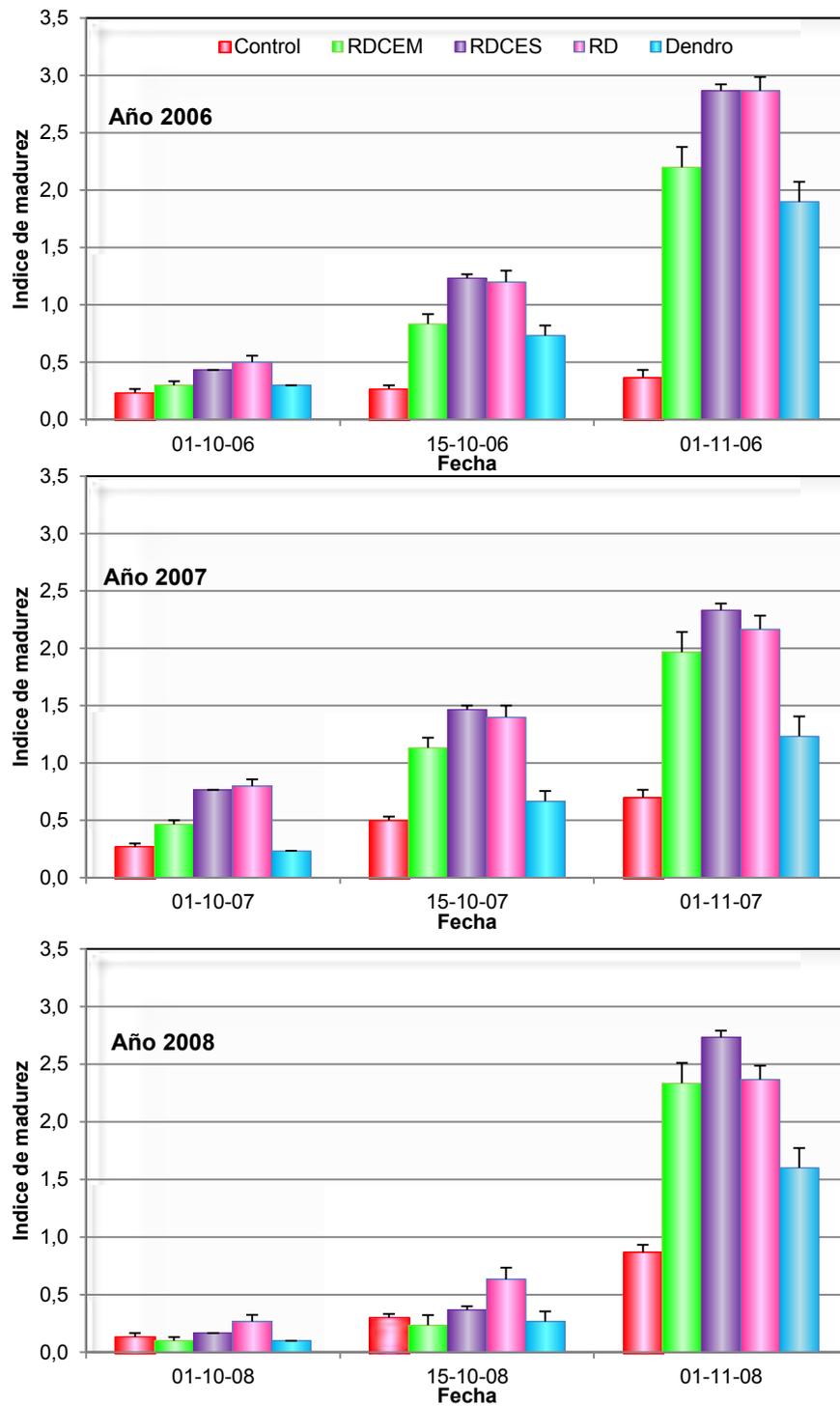


Figura 21. Evolución del Índice de Madurez a lo largo del mes de Octubre hasta la cosecha, en los tres años de la experiencia, año 2006, 2007 y 2008. Los segmentos verticales representan el error típico.

Como podemos observar el Índice de Madurez evoluciona de forma diferente entre los tratamientos más estresados en comparación con el Control, y esto es así en los tres años de la experiencia independientemente de que sea un año de carga (años 2006 y 2008) o un año de descarga (2007) (Figura 21).

Las estrategias de riego deficitario más severo RD y RDCES tienen una evolución del Índice de Madurez muy rápido, de manera que a mediados de Octubre en los años 2006 y 2007 el IM era mayor de 1, mientras que el Control no llegó a superar este índice ni siquiera en el momento de la recolección. El tratamiento RDCEM tuvo una evolución similar pero con menor IM en todas las fechas de control y llegando a alcanzar un $IM > 2$ en el momento de la cosecha en todos los años de ensayo.

Por último el tratamiento Dendro presentó unos valores de IM intermedios. Su evolución fue parecida a la del Control en las primeras fechas, pero en el momento de la cosecha se observa un aumento de la maduración superando los valores alcanzados por el Control, aunque sin alcanzar en ningún caso el grado de madurez obtenido por los riegos deficitarios.

Así pues, el IM en el momento de la cosecha resultó ser proporcionalmente mayor en las estrategias con más estrés que en las menos estresadas, Esto concuerda con los datos de Motilva et al. (2000) y Girona et al. (2001), en sendos estudios de riego deficitario continuado a lo largo del año en cultivo tradicional de Arbequina (marcos de 10x10 m), donde a medida que el déficit hídrico aumentaba lo hacía el Índice de Madurez. Los mismos resultados encontraron Berenguer et al. (2006) en un ensayo en cultivo superintensivo de Arbequina (1.656 olivos /Ha) realizado con siete niveles de riego deficitario continuado: el IM disminuía a medida que los árboles recibían más agua, en las dos fechas de cosecha estudiadas (finales de Octubre, finales de Noviembre).

Así pues, en nuestro ensayo las diferencias encontradas entre los tratamientos en el momento de la recolección fueron significativas al 95% entre el Control y el resto de los tratamientos en los tres años de ensayo (Tabla 29). A su vez el Tratamiento Dendro también presentó diferencias significativas con el resto de los tratamientos en los tres años de la experiencia, siendo el segundo tratamiento con menos Índice de Madurez.

Tabla 29. Índice de Madurez (IM) en el momento de la cosecha para los tres años de la experiencia. (Años 2006, 2007 y 2008). Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Índice de Madurez (IM)					
	2006		2007		2008	
Control	0,4±0,1	c	0,7±0,1	c	0,9±0,1	d
RDCEM	2,2±0,1	b	2,6±0,1	a	2,3±0,1	b
RDCES	2,9±0,2	a	2,3±0,1	a	2,7±0,0	a
RD	2,9±0,1	a	2,2±0,1	a	2,4±0,1	b
Dentro	1,9±0,2	b	1,2±0,2	b	1,6±0,1	c

Los tratamientos más estresados tuvieron un comportamiento algo más aleatorio, su IM siempre fue muy superior al Control y al Dentro, y entre ellos dos de los tres años (2006 y 2008, años de carga) presentaron una mayor IM los tratamientos RDCES y RD frente al tratamiento RDCEM. Berenguer et al. (2006) observaron como en un ensayo realizado con siete niveles de riego el IM disminuía a medida que los árboles recibían más agua.

El hecho de que la maduración se adelante en las estrategias con estrés deberá ser tenido en cuenta para la determinación del momento de la cosecha.

Paralelamente se determinó el contenido de humedad de la aceituna y su contenido en grasa por el método Soxhlet (Tabla 30). El contenido de humedad del fruto fue disminuyendo a lo largo del mes de Octubre conforme el IM de aumentaba. El menor contenido de humedad se encontró en los tratamientos más estresados RD y RDCES para todas las fechas de determinación y en los tres años de la experiencia, habiendo diferencias significativas al 95% con el Control y con el tratamiento Dentro.

Un efecto similar fue observado por Motilva et al. (2000) en un ensayo con 4 niveles de RDC en los meses de Julio y Agosto. El menor contenido en humedad se relacionaba con el mayor IM a lo largo de los meses de Octubre y Noviembre, que correspondía con los tratamientos con mayor estrés, aunque estas diferencias en el momento de la recolección no siempre eran significativas. Este efecto también lo confirman Dag et al. (2008) en un estudio de transformación de un cultivo tradicional del cv Souri en seco a cultivo con riego. En su caso, no encuentran diferencias significativas en el IM en el momento de la recolección para los 6 niveles de riego ensayados que iban desde seco hasta la aplicación de agua en exceso (seco, 25%, 50%, 75%, 100% y 125% Etc).

El contenido en aceite expresado como porcentaje sobre peso seco, aumenta con el Índice de Madurez en todos los tratamientos, de forma que aunque inicialmente no se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos de riego deficitario, sí existen entre éstos y el Control. A medida que nos acercamos a la fecha de recolección sí encontramos diferencias estadísticamente significativas entre las distintas estrategias de riego.

De forma que en el año 2006, el RD presenta el mayor porcentaje de grasa, seguido del RDCES, mientras que los tratamientos con menor estrés hídrico, Control, RDCEM, y Dendro presentan un contenido en grasa de al menos 4 puntos menor que el RD (Tabla 30).

Tabla 30. Índice de Madurez, contenido en humedad y contenido en grasa del fruto de Arbequina en cultivo superintensivo en relación a la fecha de recolección y a los tratamientos de riegos aplicados en los tres años de estudio 2006, 2007 y 2008

Fecha de determinación	Año 2006					
		I Madurez	% Humedad		% Grasa	
01/10/2006	Control	0,2	56,7±0.4	a	39,1±0.2	b
	RDCEM	0,3	53,6±1.1	ab	42,6±0.2	ab
	RDCES	0,4	51,6±1.8	b	44,2±0.6	a
	RD	0,5	50,2±0.7	bc	46,7±0.7	a
	Dendro	0,3	54,5±0.03	a	43,6±0.4	a
15/10/2006	Control	0,3	51,4±0.04	ab	45,2±0.4	b
	RDCEM	0,8	50,4±2.0	ab	46,4±0.5	ab
	RDCES	1,2	44,4±0.7	c	51,6±0.8	a
	RD	1,2	47,4±1.2	bc	50,7±0.3	a
	Dendro	0,7	54,4±1.2	a	42,3±1.2	b
01/11/2006	Control	0,4	45,4±1.3	a	53,4±1.2	abc
	RDCEM	2,2	42,0±0.4	bc	50,8±0.3	c
	RDCES	2,9	42,3±1.3	bc	56,2±0.1	ab
	RD	2,9	40,4±0.8	c	57,3±0.5	a
	Dendro	1,9	44,2±0.6	ab	52,5±0.3	bc

	Año 2007					
Fecha de determinación		I Madurez	% Humedad		% Grasa	
01/10/2007	Control	0,3	57,7±0.5	a	40,3±1.0	b
	RDCEM	0,5	55,2±1.3	ab	43,9±1.0	a
	RDCES	0,8	52,3±1.7	b	45,5±1.4	a
	RD	0,8	52,1±0.7	b	48,3±0.6	a
	Dendro	0,2	56,3±0.1	ab	44,9±0.1	a
15/10/2007	Control	0,5	52,6±0.0	a	46,5±1.1	b
	RDCEM	1,1	50,8±1.9	a	47,7±2.4	b
	RDCES	1,5	44,6±0.4	b	52,9±0.7	a
	RD	1,4	46,7±0.9	b	53,3±1.3	a
	Dendro	0,7	54,4±0.7	a	44,0±0.2	b
01/11/2007	Control	0,7	46,6±1.1	a	54,7±2.0	abc
	RDCEM	2,0	44,4±0.2	bc	52,1±0.5	c
	RDCES	2,3	44,0±1.2	bc	57,5±0.7	ab
	RD	2,2	42,7±0.8	c	58,6±0.5	a
	Dendro	1,2	46,0±0.5	ab	53,8±0.9	bc
	Año 2008					
		I Madurez	% Humedad		% Grasa	
01/10/2008	Control	0,1	58,8±0.4	a	41,1±0.9	b
	RDCEM	0,1	56,4±1.3	ab	44,5±1.0	ab
	RDCES	0,2	53,2±1.6	b	46,1±1.4	a
	RD	0,3	53,3±0.7	b	48,7±0.9	a
	Dendro	0,1	57,5±0.1	ab	45,5±1.0	ab
15/10/2008	Control	0,3	53,7±0.0	a	47,2±1.0	bc
	RDCEM	0,2	52,0±1.9	ab	48,4±1.1	b
	RDCES	0,4	45,8±0.4	c	52,6±0.7	a
	RD	0,6	49,0±0.9	bc	53,4±1.3	a
	Dendro	0,3	55,6±1.0	a	44,3±1.1	c
01/11/2008	Control	0,9	47,5±0.9	a	55,4±1.9	abc
	RDCEM	2,3	45,1±0.4	bc	52,8±0.5	c
	RDCES	2,7	45,0±1.2	bc	58,2±1.0	ab
	RD	2,4	43,5±0.8	c	59,3±0.5	a
	Dendro	1,6	47,2±0.6	ab	54,5±0.9	bc

El año 2007 y 2008 se repite esta pauta, constatándose un ligero aumento del contenido en grasa año a año, y manteniéndose ese mayor contenido en grasa de 4 puntos del RD sobre los tratamientos menos estresados.

Resultados parecidos fueron observados para las mismas fechas y en Arbequina en la zona de Lérida por Motilva et al. (2000), aunque ellos observaron una evolución del contenido en grasa del tratamiento 100% ETc, a lo largo del mes de Noviembre de forma que se igualaron los resultados con los tratamientos más estresados.

Varios estudios sobre riego en olivo (Pastor et al. 1999; Patumi et al. 1999) apuntan como el contenido en aceite en tratamientos de riego deficitario eran similares e incluso superiores a los tratamientos bien regados. Este aumento en el contenido de aceite del fruto podría explicarse por la ausencia de estrés hídrico durante el último periodo de acumulación de aceite en el otoño, porque se reanuda el riego al 100% de la ETc, caso de los riegos deficitarios controlados, y por las lluvias de otoño en el caso del RD.

3.4.2 Producción de aceitunas

La producción muestra diferencias anuales, de manera que el año 2007 es significativamente menos productivo que 2006 y 2008. Esto parece tener que ver con el dato citado anteriormente de un menor número de frutos en ese año en todos los tratamientos (año de descarga).

Si nos fijamos en la producción anual de las distintas estrategias (Tabla 31) vemos que en el año 2006 el tratamiento Control, el Dendro y el RDCEM tienen una producción muy similar y presentan diferencias significativas con los tratamientos de mayor estrés RDCES y RD.

Tabla 31. Producción de aceitunas en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y producción acumulada. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Producción (Kg/Ha)							
	2006		2007		2008		Acumulada	
Control	5.610±118,4	a	4.741±41,6	a	6.923±213,6	a	17.274	a
RDCEM	5.327±168,7	a	4.661±244,9	a	6.153±294,9	b	16.141	b
RDCES	4.188±76,1	b	3.304±81,8	b	4.937±93,3	c	12.129	c
RD	4.314±82,3	b	3.247±124,8	b	4.567±135,2	c	12.128	c
Dentro	5.543±237,4	a	4.789±95,0	a	7.029±62,0	a	17.361	a

En el año 2007 se mantienen las diferencias significativas entre el tratamiento Control, Dentro y RDCEM con los tratamientos RD y RDCES, aunque con producciones más bajas que en el 2006 para todos los tratamientos. Este descenso en la producción supuso un 15 % menos en el Control pero alcanzó un 24% en el caso del RD y un 21% en el RDCES. Lo cual es indicativo de que el fenómeno de la vejería estaría atenuado por el riego. Respecto a este particular hay que señalar que el tratamiento Dentro se comportó de forma similar al Control a pesar de que el agua recibida fue similar a la del RDCES, por lo que se podría decir que con un mismo aporte de agua pero aplicada de una forma enfocada a no dilatar el estrés en el árbol más de dos días seguidos se obtendría un efecto positivo sobre la producción.

En el año 2008 vuelve a aumentar la producción en todos los tratamientos y se alcanzan rendimientos similares a los de 2006, incluso algo superiores en los tratamientos más regados. Las diferencias entre el Control y Dentro con el resto de los tratamientos se mantienen, de manera que el tratamiento Dentro mantiene un comportamiento similar al Control en cuanto a producción de aceituna, con un menor consumo de agua total.

Si estudiamos la producción acumulada de tres años, vemos como los tratamientos Control y Dentro consiguen una producción de aceitunas significativamente superior al resto de los tratamientos como consecuencia de tener un mayor número de frutos y un mayor peso de las aceitunas en el momento de la cosecha. El tratamiento de estrés moderado RDCEM supuso un descenso en la cosecha acumulada de tres años del 7%, mientras que los tratamientos más estresados RD y RDCES supusieron un descenso de cosecha del 30% frente al Control. Moriana et al. (2003) obtuvieron resultados similares, de forma que encontraban diferencias significativas entre la producción del tratamiento Control

(100%ETc) y la de los riegos deficitarios por ellos empleados (RD continuado del 75%, y RDC con estrés entre los meses de Julio y Septiembre). Sin embargo no encontraban diferencias significativas entre sus estrategias de riego deficitario, a pesar de tener descensos de producción entre el 16% y el 30% respecto al Control en los distintos años de su experiencia.

Los datos anteriores parecen indicar que el mayor desarrollo vegetativo de los brotes productivos y el aumento del peso de las aceitunas son definitivos a la hora de conseguir la producción final. Iniesta et al. (2009) también achacan a un menor crecimiento vegetativo la reducción de la cosecha que encuentran en situaciones de riego deficitario continuo del 25% de la ETc, y en riegos deficitarios continuados del 50% de la ETc y sin riego en los meses de Julio y Septiembre, que en su caso supuso una pérdida de cosecha del 25% para ambos riegos deficitarios frente al Control (100% ETc).

Gómez Rico et al. (2007) en un ensayo con la variedad Cornicabra en cultivo tradicional estudiaron el comportamiento del olivo en seco frente a diferentes estrategias de riego deficitario y riegos del 100% ETc y del 125% ETc. En su experiencia observaron cómo la producción media a lo largo de 4 años de ensayo en condiciones de seco era mucho menor (alrededor del 35%), que la de los tratamientos regados, entre los cuales no encontró diferencias. Estas observaciones concuerdan también con las obtenidas por Patumi et al. (1999) y Pastor et al. (1999), que sí observaron un aumento de la producción con el riego, aunque sin diferencias significativas entre las dosis ensayadas por ellos. Asimismo, en otra experiencia Moriana et al. (2013) encuentran que con un nivel de estrés moderado (que ellos miden con las variaciones de la máxima contracción diaria) el rendimiento no se ve afectado con respecto al control regado totalmente.

3.4.3 Rendimiento graso

En el momento de la cosecha se determinó el rendimiento graso para los distintos tratamientos de riego por el Método Abencor. La Tabla 32 detalla los valores obtenidos para los tres años de la experiencia

Tabla 32. Rendimiento graso industrial en el momento de la cosecha medido por el método Abencor para las distintas estrategias de riego en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y el promedio de los tres años. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	Rendimiento graso (%)							
	2006		2007		2008		Promedio	
Control	21,3±0,3	b	22,7±0,5	c	20,8±0,2	c	21,6	b
RDCEM	20,5±0,3	b	22,2±0,5	c	24,3±0,3	ab	22,3	b
RDCES	23,0±0,5	a	26,6±0,3	ab	25,7±0,8	a	25,1	a
RD	23,6±0,3	a	28,2±2,4	a	25,7±0,7	a	25,8	a
Dentro	21,6±0,6	b	24,1±1,3	bc	23,0±1,0	b	22,9	b

Como se observa en la tabla los tratamientos con mayores rendimientos grasos son los más estresados (RDCES y RD), alcanzándose valores de entre 4 y 5 puntos por encima del Control en el año 2007. Esto responde al hecho de que el Control tiene un mayor contenido de humedad en los frutos lo que podría afectar al proceso de extracción del aceite (Motilva et al., 2000). Resultados similares fueron encontrados Berenguer et al. (2006), en un ensayo llevado a cabo los años 2002 y 2003 en un cultivo de Arbequina en superintensivo con 7 niveles de Riego Deficitario, en el cual observaron un aumento en el rendimiento graso a medida que el déficit hídrico aumentaba.

Por su parte, Grattan et al. (2006) comprobaron que el porcentaje de aceite extraído de muestras de 100 olivos mediante el método Abencor descendía linealmente con el aumento de riego aplicado. Iniesta et al. (2009) encontraron que la concentración de aceite extraída a partir de frutos frescos era mayor en los tratamientos sometidos a déficit hídrico. Por último, García et al. (2013) también vieron como la producción se veía disminuida en los tratamientos de RD y RDC frente al control, pero a la vez la extracción de aceite se veía favorecida en los tratamientos con déficit hídrico.

Por el contrario, Pastor et al. (1999) en un ensayo con tres niveles de riego (80% ETc, 100 ETc y 120%ETc) en comparación con un cultivo en secano, sólo encontraban diferencias significativas entre el tratamiento de secano con los tratamientos regados, pero no entre estos, tanto para la producción como para el rendimiento graso. Otros autores no encontraron ninguna diferencia en el contenido en aceite entre tratamientos regados y no regados (Michelakis et al., 1994).

Como se detalla en la Tabla 32 todos los años hubo diferencias significativas entre las estrategias RDCES y RD y los tratamientos menos estresados. Estos presentaron menos rendimiento graso siendo el tratamiento Dendro el que mayor valor alcanzó de media en los tres años aunque sin diferencias significativas con el RDCEM y el Control. Alegre et al. (2001), también encontraron un aumento progresivo del rendimientos graso frente al control en un estudio en Arbequina de tres niveles de RDC (25 %ETc, 50%ETC y 75% ETc) durante la parada vegetativa estival.

Al contrario que la producción de aceitunas, el rendimiento graso es mayor en los tratamientos deficitarios RDCES y RD y menor en el resto de los tratamientos de riego. Esto tendría que ver con las diferentes aptitudes de las aceitunas en el proceso de extracción del aceite. Los frutos de olivos regados con más dosis de agua, y que mantuvieron un mayor contenido de humedad en el momento de la cosecha presentan mayores dificultades para la extracción, formándose emulsiones al centrifugar la pasta, lo que reduce el rendimiento industrial (Alegre et al. 2001).

3.4.4 Producción de aceite

Los datos de producción de aceite se estimaron a partir del rendimiento graso y del peso de la cosecha. La Tabla 33 muestra la producción de aceite por Ha y año. En ella también se ha calculado la producción de aceite acumulada a lo largo de la experiencia para evitar las distorsiones que podría producir el hecho de que los rendimientos anuales sean diferentes por el efecto de la vecería en el olivo.

Tabla 33. Producción de aceite por unidad de superficie (Kg aceite /Ha) para las distintas estrategias de riego en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y producción acumulada de los tres años. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P<0,05$.

Tratamiento	Rendimiento Kg aceite/Ha)							
	2006		2007		2008		Acumulado	
Control	1196±53,1	a	1075±21,9	a	1438±47,4	ab	3707	a
RDCEM	1090±24,4	ab	1037±63,7	ab	1496±80,7	a	3622	a
RDCES	963±20,9	b	880±19,0	b	1271±45,1	bc	3113	b
RD	1018±9,8	b	911±51,8	b	1171±20,5	c	3099	b
Dendro	1198±64,5	a	1153±68,5	a	1614±79,3	a	3965	a

Según lo anterior, la máxima producción acumulada en los tres años de experiencia se consigue con las estrategia de riego Dendro, sin diferencias significativas con el Control y con RDCEM, aunque si con el resto de estrategias. El

tratamiento RDCEM consigue unos rendimientos acumulados algo menores que el Control pero sin diferencias significativas. Por último, los que menos producción de aceite consiguen son los tratamientos sometidos a estrés continuado (RD) y el riego deficitario controlado con estrés severo (RDCES).

Así pues las diferencias en el contenido de aceite entre los tratamientos (Tabla 32) se ven compensadas por el peso de la cosecha, consiguiendo finalmente una mayor producción de aceite en los tratamientos con menos estrés. Estas diferencias fueron mayores en los años de carga que en los de descarga, efecto también observado por Moriana et al. (2003), Ben-Gal et al. (2011), los cuales observaron una tendencia a una mayor producción de aceite conforme aumentaba el riego, achacando esta mayor producción de aceite al mayor número de frutos conforme aumentaba el riego. Patumi et al. (2002), no observaron diferencias significativas en el contenido de aceite de los frutos en el momento de la recolección entre tratamientos en secano, y tratamientos regados con distintos niveles de la ETc (33, 66 y 100 %ETc), pero si observaron diferencias en la producción de aceite, debido a la mayor producción de cosecha conforme aumentaba el riego aplicado. Estos mismos resultados obtuvieron Moriana et al. (2003) en un cultivo de Picual de 18 años de edad, de forma que el Control fue el que mayor producción obtuvo, mientras que observaron un descenso en la producción entre un 15 -20 % en los tratamientos de RD y RDC, cuando la reducción del agua aplicada oscilaba entre un 34-35% respecto al Control (100% ETc).

Pastor et al. (1999), observaron como la producción de aceite era significativamente mayor en los olivos regados que en los de secano, observándose un aumento en la producción del 71% en el olivar regado con la menor dotación respecto del secano durante los 6 años de su experiencia, pero no observaron diferencias entre las distintas estrategias de riego deficitario.

Grattan et al. (2006) comprobaron que la producción de aceite por árbol también estaba influida por el momento de la recolección. En la recolección tardía, el aceite obtenido aumentaba con el agua aplicada hasta alcanzar un máximo con un riego correspondiente al 75%ETc, y a partir de esos valores la producción descendía. Sin embargo, en la recolección temprana los tratamientos que recibían menos agua (33% ETc) resultaron ser más productivos que aquellos más regados (90% ETc). Por último, los tratamientos con un estrés moderado (55-75 % ETc), no veían influenciada su producción de aceite por la época de recolección. Todo lo anterior parece indicar

que el óptimo de extracción de aceite se encontraría en un amplio rango de riego (40-89 % ETc), y que para tratamientos más regados se hallaría una mayor dificultad en la extracción de aceite al tener un mayor contenido de humedad el fruto.

3.4.5 Eficiencia del riego

Por último, hemos obtenido la relación entre los kilos de aceite obtenidos en relación al agua de riego aportada en cada tratamiento para medir de manera indirecta la eficiencia de las estrategias de riego (Tabla 34).

Tabla 34. Eficiencia hídrica de los tratamientos medida como la producción de aceite por unidad de agua aplicada (Kg aceite /mm agua aplicada) para las distintas estrategias de riego en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) y producción acumulada de los tres años. Diferentes letras representan una diferencia significativa a P<0,05.

Tratamiento	Eficiencia hídrica (Kg aceite/mm agua aplicada)							
	2006		2007		2008		Acumulado	
Control	2,55±0,11	a	2,41±0,05	a	3,34±0,11	a	2,75±0,02	a
RDCEM	2,84±0,06	a	2,87±0,18	ab	4,30±0,23	b	3,32±0,11	b
RDCES	2,83±0,06	a	2,77±0,06	a	4,14±0,15	ab	3,23±0,06	b
RD	4,33±0,04	c	4,08±0,23	c	5,44±0,10	c	4,60±0,12	c
Dendro	3,66±0,20	b	3,77±0,22	b	5,52±0,27	c	4,28±0,12	c

Como era de esperar el tratamiento Control que recibe una mayor cantidad de agua es el que menor eficiencia de riego obtiene en todos los años de la experiencia y en el acumulado. Lo que se observa es que en el año 2006 no existen diferencias significativas con los riegos deficitarios controlados, RDCES y RDCEM, pero si con el riego deficitario RD y con el Dendro, siendo el RD el que mayor rendimiento consigue.

En el año 2007 se mantienen las mismas diferencias significativas que en el año 2006, aunque el tratamiento RDCEM se aleja del RDCES y del Control. Esta tendencia a separarse de las distintas estrategias se confirma en el año 2008, cuando ya existen diferencias significativas entre el Control y el resto de los tratamientos. Los tratamientos RD y Dendro son los que más rendimiento hídrico tienen aunque cada uno de ellos por motivos diferentes. Esto es, en el RD se obtiene un mayor rendimiento hídrico debido al ahorro de agua, y en el Dendro debido a que ha habido un aumento de la producción de aceite (Tabla 33).

Como se ve en la Tabla 34, en el conjunto de los años hay diferencias significativas entre el Control y el resto de los tratamientos. Los riegos deficitarios

controlados no presentan diferencias significativas entre ellos, pero si con el resto, y el RD y Dendro consiguen el mayor rendimiento hídrico, no presentando diferencias entre ellos.

3.4.6 Efectos globales de las estrategias de riego sobre la producción

Como se ha visto el riego ha tenido un efecto sobre la producción de aceituna desde el primer año de ensayo, cuando el RD ya presentaba menores producciones y con diferencias significativas con el resto de los tratamientos aplicados.

Este efecto sobre la producción se ha desarrollado de forma paulatina y gradual, de forma que el segundo año (2007) los tratamientos estresados RD y RDCES conseguían menores producciones y estas diferencias eran significativas. Por último, en 2008 incluso la menor producción del tratamiento RDCEM es diferente estadísticamente del resto de los tratamientos.

A lo largo de los tres años los tratamientos Control y Dendro son los que mayor producción han dado sin diferencias significativas entre ellos cifrándose esta mayor producción en un 30% más que los tratamientos de RD y RDCES.

En sentido contrario responde el rendimiento graso de la aceituna en el momento de la recolección, de forma que los tratamientos más estresados RD y RDCES siempre presentan mayor contenido en grasa que el resto de los tratamientos, siendo estas diferencias significativas.

A pesar de ello este aumento del rendimiento graso, no compensa la menor producción de aceituna en los tratamientos de mayor estrés, de forma que los tres años de ensayo la producción de aceite por hectárea fue menor en los tratamientos RD y RDCES, con diferencias significativas con el resto de los tratamientos que se comportaron de forma similar.

Así pues si estos resultados los traducimos en términos de rendimiento hídrico en la producción de aceite, vemos que los tratamientos que mejor se comportan son el RD y el Dendro. De forma que, la alternativa de riego Dendro obtiene unos resultados muy interesantes ya que consigue altas producciones, superiores al Control (100% ETc) en el global de los tres años, con un consumo de agua un 30% menor que este.

3.5 Calidad y composición de los aceites obtenidos.

3.5.1 Parámetros de calidad de los aceites: Acidez, Índice de peróxidos, K270 y K232.

Todos los aceites obtenidos en los distintos tratamientos son de Calidad Aceite de oliva Virgen Extra, así mismo, en nuestro caso al ser una plantación en La Rioja vemos que también cumple con las especificaciones de Calidad Aceite de Oliva Virgen Extra "Aceite de La Rioja", según los parámetros legales reflejados en Tabla 35.

Tabla 35. Características físico-químicas de los aceites producidos en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) en los distintos tratamientos riego. Diferentes letras representan una diferencia significativa a $P < 0,05$.

Tratamiento	AÑO 2006							
	Acidez		Peróxidos		K270		K232	
Control	0,10±0,02		3,50±0,72		0,11±0,02		1,97±0,03	a
RDCEM	0,11±0,01		3,30±0,36		0,10±0,01		1,63±0,01	b
RDCES	0,11±0,02		3,60±0,29		0,10±0,02		1,47±0,05	b
RD	0,11±0,02		3,20±0,37		0,11±0,02		1,40±0,02	b
Dendro	0,10±0,02		3,50±0,35		0,09±0,00		1,67±0,15	b
Aceite de oliva Virgen extra	<0,8		<20		<0,22		<2,50	
Aceite de oliva Virgen extra "Aceite de La Rioja"	<0,8		<15		<0,20		<2,50	
Tratamiento	AÑO 2007							
	Acidez		Peróxidos		K270		K232	
Control	0,08±0,00	b	7,09±0,34		0,09±0,00		1,87±0,04	a
RDCEM	0,09±0,00	a	6,39±0,47		0,10±0,01		1,47±0,03	b
RDCES	0,08±0,00	b	6,68±0,61		0,09±0,00		1,5±0,06	b
RD	0,08±0,00	b	6,26±0,78		0,11±0,00		1,3±0,06	c
Dendro	0,08±0,00	b	5,94±0,47		0,10±0,00		1,53±0,03	b
Aceite de Oliva Virgen Extra	<0,8		<20		<0,22		<2,50	
Aceite De Oliva Virgen Extra "Aceite de La Rioja"	<0,8		<15		<0,20		<2,50	

Tratamiento	AÑO 2008				
	Acidez	Peróxidos	K270	K232	
Control	0,08±0,01	5,49±0,76	0,10±0,01	1,77±0,03	a
RDCEM	0,09±0,01	5,94±0,52	0,09±0,00	1,57±0,03	b
RDCES	0,09±0,00	5,82±0,34	0,10±0,01	1,47±0,03	b
RD	0,09±0,00	5,97±0,58	0,10±0,00	1,27±0,03	c
Dendro	0,09±0,00	5,63±0,47	0,10±0,00	1,5±0,06	b
Aceite de Oliva Virgen Extra	<0,8	<20	<0,22	<2,50	
Aceite de Oliva Virgen Extra "Aceite de La Rioja"	<0,8	<15	<0,20	<2,50	

Estos parámetros de calidad tienen que ver más con el estado sanitario de las aceitunas en el momento de la recolección y con el manejo que se tiene de los frutos a la hora de transformarlos en aceite, como es el caso de la Acidez o contenido en ácidos grasos libres. El riego, sea cual sea su manejo, no parece afectar a la calidad de los aceites obtenidos en el ensayo, no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la mayoría de los parámetros de calidad estudiados.

En este sentido, podemos apuntar que existe un ligerísimo aumento de la acidez en los aceites provenientes de aceitunas que han sufrido mayor estrés hídrico, en el caso de los años con carga, pero sin diferencias significativas. En los años de descarga, esta acidez es mayor en el tratamiento RDCEM, habiendo incluso diferencias significativas con el resto de los tratamientos, pero en este caso es difícil relacionarlo con el estrés ya que es un tratamiento intermedio. No ocurre así respecto al índice de peróxidos en los que no encontramos diferencias significativas entre tratamientos ningún año, y en el que tampoco encontramos ninguna tendencia dependiendo del tratamiento de riego.

Gómez-Rico et al. (2007) observaron que los distintos niveles de riego ensayados en la variedad Cornicabra (desde cultivo en seco hasta un riego del 125% de la ETc), no influyeron en la acidez ni en el índice de peróxidos de forma significativa. Análogos resultados habían sido obtenidos en la variedad Arbequina por Tovar et al. (2002) y por Patumi et al. (2002) en la variedad Kalamata. Gómez-Rico et al. (2007) encontraron diferencias significativas en acidez e Índice de peróxidos entre

el tratamiento en secano y el riego en un año de ensayo debido a un alto nivel de daño por mosca del olivo, pero en ningún caso afectaron a la calidad final del aceite.

Por el contrario Dag et al. (2008), en un ensayo con 6 niveles de riego sobre la variedad Souri, observaron una tendencia del aumento de la acidez conforme aumentaba los niveles de riego, de forma que en su primer año de ensayo el aceite obtenido del tratamiento en secano obtuvo una acidez de 0,6, mientras que el tratamiento más regado (125% ETc) obtuvo una acidez de 1,49. Resultados similares encontraron el segundo año de ensayo pero, en este caso el máximo de acidez fue para el riego de 75%ETc, aunque sin diferencias con riegos superiores. Este efecto se observó principalmente en el aceite proveniente de recolección mecanizada. En los aceites de recolección manual también se constató un aumento de la acidez con el riego pero de forma más leve. Esto sugiere que bajo condiciones específicas de riegos altos las aceitunas son mucho más sensibles a los daños mecánicos producidos en la recolección. Esto puede ser debido a la mayor sensibilidad a lesión mecánica de la fruta con mayor contenido de agua y con cutícula más delgada (Patumi et al. 2002). Esta mayor sensibilidad de las aceitunas provenientes de árboles regados frente a árboles en secano ya la habían detectado Gómez Rico et al. (2007) en la variedad Cornicabra.

Por otro lado, el único parámetro en el que encontramos diferencias significativas entre tratamientos es el K232. Este parámetro nos indica la oxidación inicial del aceite, al igual que el Índice de peróxidos, aunque no se ha encontrado una correlación entre ellos en nuestra experiencia.

El K232 es más alto en el Control que en el resto de los tratamientos, de forma que va disminuyendo conforme el riego aplicado ha sido menor, encontrándose diferencias significativas entre el Control y los tratamientos RDCEM y RDCES, en los tres años de experiencia. En el caso de RD el K232 siempre es menor que el resto de los tratamientos, habiendo siempre diferencias significativas con el Control e incluso con el resto de los tratamientos en los años 2007 y 2008. En el caso del Dendro tiene un comportamiento más aleatorio en los distintos años de la experiencia, obteniendo unos valores intermedios.

Es decir, que al igual que ocurre con la acidez, a medida que el contenido en agua del fruto aumenta y por tanto aumenta su sensibilidad a daños mecánicos, se produce un aumento en el parámetro K232, pero además en este caso con diferencias

significativas entre tratamientos, por lo que en el momento de la recolección y transformación hay que tener más cuidado con la aceituna proveniente de tratamientos más regados (Dag et al. 2008, Patumi et al. 2002).

En todas las muestras de aceite analizados (Tabla 35), la acidez libre, el índice de peróxidos y coeficientes de extinción estuvieron muy por debajo de los límites establecidos para los aceites de oliva virgen extra. El régimen de riego tuvo efectos menores sobre la acidez libre y el I. de peróxido, y tuvieron un mayor efecto sobre el parámetro K232, efecto que está de acuerdo con otros resultados anteriores. (Dabbou et al. 2010; Patumi et al., 2002; Berenguer et al., 2006; Gómez-Rico et al., 2007) y, especialmente, los trabajos realizados por Tovar et al. (2001) y Berenguer et al. (2006) sobre aceites de oliva virgen de arbequina que encontraron inconsistencias en los cambios inducidos por el riego.

Así pues, podemos decir que ninguno de los tratamientos de riego aplicados tienen un efecto suficiente sobre el aceite como para producir una salida de la categoría Aceite de Oliva Virgen Extra “Aceite de La Rioja”, es decir el riego no ha afectado a la calidad final del aceite.

3.5.2 Contenido en ácidos grasos

En cuanto al contenido en ácidos grasos todos los aceites están dentro de los rangos de calidad de Aceite oliva virgen extra, independientemente del tratamiento y del año de producción. (Tabla 36).

Tabla 36. Contenido en ácidos grasos de los aceites producidos en los tres años de la experiencia (Años 2006, 2007 y 2008) en los distintos tratamientos riego. Diferentes letras representan una diferencia significativa a P<0,05.

Tratamiento	AÑO 2006					
	A. Oleico	A. Palmítico	A. Linoleico	A. Esteárico	A. Palmitoleico	
Control	77,47±2,53,	7,23±1,59	7,23±0,89	1,60±0,25	a	1,03±0,1
RDCEM	77,50±2,20	7,27±1,49	7,27±0,60	1,53±0,23	a	1,27±0,2
RDCES	77,40±2,20	7,13±1,46	7,13±0,72	1,57±0,18	a	1,27±0,1
RD	77,07±2,45	7,50±1,51	7,50±0,81	1,70±0,20	a	1,27±0,1
Dendro	77,77±2,03	7,40±1,49	7,40±0,77	1,33±0,15	b	1,20±0,3
Aceite de oliva Virgen extra	55-83	7,5-20	3,5-21	0,5-5		0,3-3,5

AÑO 2007							
Tratamiento	A. Oleico	A. Palmítico	A. Linoleico	A. Esteárico		A. Palmitoleico	
Control	78,07±1,50	11,97±0,55	7,47±0,76	1,47±0,24	a	1,03±0,07	
RDCEM	78,33±1,23	11,90±0,40	7,30±0,61	1,50±0,21	a	0,97±0,12	
RDCES	78,47±1,30	11,93±0,52	7,37±0,55	1,40±0,23	a	0,97±0,09	
RD	77,87±1,77	11,83±0,47	7,33±0,70	1,57±0,26	a	1,03±0,09	
Dendro	78,37±1,41	11,77±0,38	7,57±0,86	1,20±0,17	b	1,10±0,15	
Aceite de Oliva Virgen Extra	55-83	7,5-20	3,5-21	0,5-5		0,3-3,5	
AÑO 2008							
Tratamiento	A. Oleico	A. Palmítico	A. Linoleico	A. Esteárico		A. Palmitoleico	
Control	77,33±1,88	13,30±0,76	6,87±0,91	1,50±0,23		1,00±0,15	
RDCEM	77,70±1,61	13,13±0,72	6,67±0,78	1,43±0,18		1,07±0,22	
RDCES	77,53±1,86	13,37±0,85	6,70±0,78	1,43±0,20		0,97±0,22	
RD	77,47±1,87	13,13±0,77	6,90±0,97	1,43±0,19		1,07±0,20	
Dendro	77,67±1,82	13,10±0,74	6,87±0,89	1,27±0,12		1,10±0,25	
Aceite De Oliva Virgen Extra	55-83	7,5-20	3,5-21	0,5-5		0,3-3,5	

Como se observa en la Tabla 36 no existen diferencias significativas para el contenido de ninguno de los ácidos grasos estudiados entre ninguno de los tratamientos de riego, ni en ninguno de los años de estudio. Esto viene a corroborar lo encontrado por Motilva et al. (2000); aunque difiere de lo visto por Gómez del Campo et al. (2013), que sí encontraron diferencias significativas en el contenido en ácido Linoleico entre los diferentes tratamientos de riego estudiados, de forma que cuando aplicaban un riego deficitario del 30% de la ETc durante el mes de Julio o un riego deficitario del 50% ETc en los meses de Julio y Agosto, encontraban un contenido menor de linoleico que en el tratamiento Control (100% ETc) y en un riego deficitario del 30% de la ETc en el mes de Agosto, que se comportaban igual.

Como resultado de lo visto, podemos decir que no existe una influencia de los tratamientos de riego estudiados sobre los parámetros físico-químicos utilizados para la determinación de la calidad del aceite de oliva Virgen extra (acidez libre, índice de peróxidos, K232 y K270), similar a lo encontrado por otros autores. Tovar et al. (2002), Gómez del Campo et al. (2013), García et al. (2013) tampoco encontraron ningún efecto significativo sobre la acidez, ni sobre los parámetros K232 y K270 como

consecuencia de diferentes niveles de riego. Por otro lado, otros autores como Dag et al. (2008), Berenguer et al. (2006) y Ramos et al. (2010), sí que han observado un aumento de la acidez conforme aumenta el riego. Este efecto lo relacionan con el mayor contenido de agua de los frutos y por lo tanto, con una mayor turgencia de los mismos. Las aceitunas serían más sensibles al golpeteo de la recolección mecánica, esto podría provocar pequeñas infecciones en las heridas producidas y, como consecuencia, un deterioro en algunos de los parámetros de calidad. En cualquier caso la variación de estos parámetros es mínima y en ningún caso se producen pérdidas de calidad comercial de aceite de oliva virgen extra

Por último la composición de los diferentes ácidos grasos no se ha visto alterada por las diferentes estrategias de riego.

Conclusiones

4 Conclusiones.

Tras los 3 años de ensayos de diferentes estrategias de riego en un cultivo de olivo conducido en condiciones superintensivas en La Rioja, las conclusiones obtenidas se detallan a continuación.

- Las diferentes estrategias de riego planteadas consiguen reducir el consumo de agua con respecto a un Control plenamente regado. Los ahorros de agua conseguidos por término medio en los tres años del ensayo han oscilado entre el 50% del RD, el 28,3 % del RDCES, el 18,9 % del RDCEM y el 31,2 % del Dendro.
- Además de lo anterior, las diferentes estrategias de riego han tenido consecuencias vegetativas y productivas, que se resumen a continuación.

1.- El RD (Reducción del riego del 50% durante todo el periodo de riego) ha afectado de forma significativa a todos los parámetros de crecimiento estudiados, de forma que ha producido una disminución en la altura del árbol, en la longitud de las ramas laterales y en el diámetro del tronco. Este efecto sobre el desarrollo vegetativo podría ser interesante para controlar el vigor en plantaciones de tipo superintensivo.

Asimismo, el RD ha afectado al desarrollo de los órganos de fructificación, lo que ha producido un menor nº de frutos en la siguiente campaña. También ha afectado al peso del fruto en el momento de la cosecha. La combinación de estos dos efectos ha llevado a una disminución acumulada de la producción de aceituna en los tres años de la experiencia de un 30% con respecto al Control. Sin embargo, la producción de aceite solo fue de un 16% menor debido a que el rendimiento graso en el momento de la recolección era mayor que en el resto de los tratamientos.

2.- El Riego Deficitario Controlado con estrés severo durante la fase de endurecimiento del hueso (RDCES) afecta a los parámetros vegetativos durante el periodo en el que se aplica. Esta estrategia de riego afecta al crecimiento en altura del árbol (siendo un 30% menor que el Control tras los tres años de ensayo) pero no afecta de forma significativa a la longitud de las ramas laterales ni al diámetro del tronco.

No se ha observado un efecto consistente en el desarrollo de los órganos fructíferos por cm de rama, pero el menor crecimiento vegetativo ha producido, como consecuencia, un menor nº de frutos total en la campaña siguiente. Así mismo, el RDCES afecta al peso del fruto en el momento de la cosecha. Estos dos factores han llevado a un descenso de la producción de aceituna del 30% y de un 16% en la producción de aceite con respecto al Control.

3.- El Riego Deficitario Controlado con estrés moderado (RDCEM) afecta a los parámetros vegetativos en el momento en el que se produce el estrés. Pero tras reanudar los riegos, el olivo es capaz de recuperar su crecimiento tanto en altura como en diámetro del tronco y en longitud de ramas laterales.

Esta estrategia ha presentado una alta capacidad de recuperación del tamaño del fruto en el otoño sin presentar diferencias significativas con el Control en el momento de la cosecha.

4.- El Riego Deficitario Controlado manejado por dendrometría (Dendro) es el que menos efectos ha tenido sobre el desarrollo vegetativo del árbol, comportándose de manera similar al Control. La altura, el diámetro del tronco y la longitud de las ramas laterales no se han visto afectadas por el tratamiento.

Tampoco se han observado diferencias significativas en cuanto a parámetro de fructificación ni a tamaño de fruto. Tras las tres campañas de riego estudiadas no hay diferencias significativas ni en la producción de aceitunas ni la producción de aceite.

- Las diferentes estrategias de riego planteadas han modificado el proceso de maduración de la aceituna y acumulación de grasa, de forma que los tratamientos más estresantes RD y RDCES son los que más aceleran el proceso de maduración. Por lo tanto, las estrategias de riego deficitario podrían adelantar la fecha de recolección frente a tratamientos regados según al ETc.
- Las estrategias de riego no han alterado la calidad de las aceitunas recogidas. Todos los tratamientos han dado como resultado la obtención de aceite de oliva virgen extra y la posibilidad de su inclusión la DOP Aceite de La Rioja.
- El RD se presenta como una buena alternativa cuando la disponibilidad de agua a lo largo de todo el periodo de riego esté limitada, en detrimento de una menor

producción, y con un menor desarrollo vegetativo. Cuando las limitaciones de agua de riego se producen en el periodo estival, las alternativas de riego deficitario controlado, RDCEM y Dendro, se presentan como dos alternativas de riego que permiten un ahorro de agua importante sin afectar a la producción y calidad del aceite. El RDCEM se presenta como la alternativa menos ventajosa, ya que el efecto sobre el crecimiento vegetativo incide en la producción de la campaña siguiente, siendo la alternativa con menor eficacia del riego después del Control.

- Se ha podido validar la estrategia Dendro como una alternativa interesante a los Riegos Deficitarios Controlados. Los resultados mostrados confirman el hecho de que es posible programar el riego del olivo en cultivo superintensivo en base a las medidas de las variaciones del diámetro del tronco como único indicador de las necesidades de riego. El empleo de las variaciones del diámetro de tronco como indicador fisiológico para el inicio de los riegos ha ahorrado cantidades significativas de agua (31,2%), sin alterar los parámetros productivos y de calidad del aceite. La conveniencia de utilizar un riego deficitario basado en la dendrometría frente al riego deficitario controlado en base a ETc radica en la posibilidad de conseguir un mejor control del estado hídrico de la planta, que redundaría en un incremento de la productividad del agua.
- Tras los resultados obtenidos quedan abiertos a estudio otros tratamientos de riego como podrían ser: el ajuste de los porcentajes de riego deficitario en las diferentes estrategias, la validación del método de la dendrometría a lo largo de todo el año y no solo en la fase de endurecimiento del hueso, el estudio de otros parámetros de la variación del diámetro del tronco como medida del estrés del árbol, etc.

Referencias

5 Referencias

Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S.R., Sánchez-Blanco, M.J., Rodríguez, P. y Torrecillas, A. 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil*, 227 (1-2): 77–85.

Alegre, S., Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Girona, J. 2002, Regulated deficit irrigation in olive trees (*Olea europaea* L, cv. “Arbequina”) for oil production, *Acta Horti* 586: 259-262.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 15-27

Asociación Española de Normalización y Certificación, Spanish Standard UNE 55020 (1973).

Baeza, P.; Lisarrague, J.R.; Sánchez de Miguel, P. 2007. Fundamentos, aplicación y consecuencias del riego en la vid. 264 pp. Editorial Agrícola Española

Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, U., Zipori, I., Presnov, E., Sprintsin, M., Dag, A. 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science* (2009) 27: 367:376

Berenguer, M.J.; Vossen, P.; Grattan, S.R.; Conell, J.H.; Polito, V.S. 2006. Tree Irrigation Levels for Optimum Chemical and Sensory Properties of Olive Oil. *Hortscience* 41(2):427–432.

Bongji G., Palliotti A. (1994) Olive. In: Schaffer B, Andersen PC (eds) Handbook of environmental physiology of fruit crops: vol. 1, temperate crops. CRC, Boca Raton, Fla., pp. 165-188.

CARM (2004). Normas de Interpretación de los análisis de agua. www.carm.es/cagr/cida/daqua.htm#R313.

Castel, J.R. and Buj, A. 1990. Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science*, 11: 121–127.

Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. y Van Heek, L.A.G. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106: 307– 312.

Chalmers, Y.M., Krstic, M.P., Downey, M.O., Loveys, B.R. y Dry, P.R. 2008. Impacts of sustained deficit irrigation on quality attributes and flavonoid composition of Shiraz grapes and wine. *Acta Hort* 792: 163–169.

Chartzoulakis, K.S., Patakas, A. y Bosabalidis, A.M.(1999). Changes in water relations, photosynthesis and leaf anatomy induced by intermittent drought in two olive cultivars. *Environmental and Experimental Botany* 42:113-120.

Chaves, M.M. (1991). Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 42, No. 234, pp. 1-16, (Jan 1991), ISSN, 0022-0957.

Cohen, Y. 1991. Determination of orchard water requirement by a combined trunksap flow and meteorological approach. *Irrigation Science*, 12: 93–98.

Conejero W., Alarcón J.J., García-Orellana Y., Abrisqueta J.M., Torrecillas A., 2007. Daily sap flow and maximum daily trunk shrinkage measurements for diagnosing water stress in early maturing peach trees during the post-harvest period. *Tree Physiology* 27: 81-88.

Cornic, G., Massacci, A. (1996). Leaf photosynthesis under drought stress. In Baker, N.R.(Ed), *Photosynthesis and Environment*, Kluwer Academic publishers, The Netherlands, pp.347-366.

Crisosto, C.H., Johnson, R.S., Luza, J.G. y Crisosto, G.M. 1994. Irrigation regimes affect fruit soluble solids concentration and rate of water loss of 'O'Henri peaches. *Hortscience*, 29: 1169–1171

Cuevas M. V., Martín-Palomo, M.J., Díaz Espejo, A., Torres-Ruiz, J.M., Rodríguez-Dominguez, C.M., Perez-Martin, A., Pino-Mejías, R., Fernández, J.E. 2013. Assessing water stress in a hedgerow orchard from sap flow and trunk diameter measurements. *Irrigation Science* (2013) 31: 729-746.

Cuevas, M.V., Torres-Ruiz, J.M., Álvarez, R., Jiménez, M.D., Cuerva, J., Fernández, J.E., 2010. Assessment of trunk diameter variation derived indices as water stress indicators in mature olive trees. *Agric. Water Manage.* 97: 1293-1302.

Dabbou, S., Chehab, H., Faten, B., Dabbou, S., Esposto, S., Selvaggini, R., Tatichi, A., Servili, M., Montedoro, G.F., and Hammami, M. 2010. Effect of three irrigation regimes on Arbequine olive oil produced under Tunisian growing conditions. *Agriculture Water Management* 97: 763-768.

Dag, A., Ben-Gal, A. Yermiyahu, U., Basheer, L., Yogev, N., Kerem, Z. 2008. The effect of irrigation level and harvest mechanization on virgin olive oil quality in a traditional rain-fed "Souri" olive orchard converted to irrigation. *J. Sci. Food Agric.* 88: 1524–1528.

De Lahera, M.L.; Romero, P.; Gómez-Plaza, E.; Martínez, A. 2007. Is partial root-zones drying an effective irrigation technique to improve water use efficiency and fruit quality in wine grapes under semiarid conditions? *Agric. Water Management* 87: 261-274

Del Rio, C. and Romero, A.M. 1999. Whole, unmilled olives can be used to determine their oil content by Nuclear Magnetic Resonance. *Hort. Technology* 9(4): 675-680.

Dichio, B., Xiloyannis, C., Sofo, A., Montanaro, G. 2006. Osmotic regulation in leaves and roots of olive trees during a water deficit and rewatering. *Tree physiology* 26: 179 - 185.

Domingo, R., Nortes, P.A., Egea, G., Torres, R. y Pérez Pastor, A. 2005. Utilización de sensores en planta para la programación del riego y uso eficiente del agua en la agricultura. *Vida Rural*, 217: 42–46.

Domingo, R., Torrecillas, A., Guzmán, C.M., Martínez, B.M., Nicolás, E y Alarcón, J.J. 1999. Medida del flujo de savia en albaricoquero por el método de pulso de calor compensatorio. XVII Congreso Nacional de Riegos. Murcia. p. 128–134.

Dos Santos T.P., Lopes C.M., Rodrigues M.L., De Souza C.R., Silva J. R., Maroco J.P., Pereira J.S., Chaves M.M., 2007. Effects of deficit irrigation strategies on

cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Sci Hort* 112: 321-330.

Doupis, G., Bertaki, M., Psarras, G. Kasapakis, I. Chartzoulakis. 2013. Water relations, physiological behavior and antioxidant defence mechanism of olive plants subjected to different irrigation regimes. *Scientia Horticulturae* 153: 150-156.

Ebel, R.C., Proebsting, E.L. and Patterson, M.E. 1993. Regulated deficit irrigation may alter apple maturity, quality and storage life. *HortScience*, 28: 141–143.

Egea, G. 2008. Caracterización y modelización de la respuesta agronómica y fisiológica del almendro al riego deficitario. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. 309 pp.

Fereres, E. and Soriano, M.A.2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J. Exp. Bot.* 58: 147-159

Fereres, E., Castel, J.R., 1981. Drip Irrigation Management. Division of Agricultural Sciences, University of California, Leaflet 21259.

Fereres, E., Ruz, C., Castro, J., Gómez, J.A., Pastor, M. 1996. Recuperación del olivo después de una sequía extrema. *Actas de XIV Congreso Nacional de Riegos. Almería.*

Fereres, E. y Orgaz, F. 1995. El Riego en el olivar. VII Simposio Científico-Técnico Expoliva. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. p. 119-123.

Fernández Alcazar, J.I. 2014. El sector oleícola riojano: evolución en las dos últimas décadas. En *Foro La Grajera por la calidad del aceite de oliva virgen extra*. 9 y 10 de septiembre de 2014

Fernández, J.E., Cuevas, M.V. 2010a. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agric. Forest. Metereol.* 150: 131-151.

Fernández, J.E., Moreno, F. Girón, I.F., Blázquez, O.M. 1997. Stomatal control of water use in olive trees leaves. *Plant Soil* 190: 179-192.

Fernández, J.E., Moreno, F. y Martin Aranda, J. (1993). Water status of olive trees under dry- farming and drip- irrigation. *Acta Hortic* (335): 157-164.

García, J.M., Cuevas, M.V., Fernández, J.E. 2013. Production and oil quality in “Arbequina” olive (*Olea europaea*, L.) trees under two deficit irrigation strategies. *Irrig. Sci.* 31:359-370.

Geerts, S., Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric. Water Manage* 96: 1275-1284.

Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. y Marsal, J. 2004. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84: 561–568.

Giner González ,J.F. 1998. Fertirrigación por goteo en olivo. Cuadernos de Fitopatología. Especial olivo. 1º trimestre 1998:31-36.

Ginestar, C. and Castel, J.R. 1995. Utilización de dendrómetros como indicador de estrés hídrico en mandarinos jóvenes. Actas del XIII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Puerto de la Cruz, Tenerife, 7-9 de Junio de 1995.

Ginestar, C. and Castel, J.R. 1996. Responses of Young clementine citrus trees to water stress during different phenological periods. *J. Hort. Sci.*71:551-559.

Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J., Marsal, J., 2005b. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agric. Water Manage* 72: 97-108.

Girona, J., Marsal, J., López, G., 2006b. Establishment of stem water potential thresholds for the response of ‘O’Henry’ peach fruit growth to water stress during stage III of fruit growth. *Acta Hort* 71: 197-201.

Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., De Jong, T., 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. *J Hort Sci Biotech* 79: 308-315.

Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E., Marsal J., 2006a. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig Sci* 24: 115-127.

Girona, J., Mata, M., Marsal, J., 2005a. Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. *Agric Water Manage* 75: 152-167.

Girona, J, Luna, M. Arbonés, A., Mata, M., Rufat, J., Marsal J. 2001. Young olive trees responses (*Olea europaea*, cv "Arbequina") to different water supplies. Water function determination. Proceedings of the fourth International Symposium on Olive Growing. Bari (Italy), 2000. *Acta Horticulturae*.

Goldhamer, D. 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: 115-128.

Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23: 11-19

Goldhamer, D.A.; Viveros, M.; Salinas, M. 2006. Regulated deficit irrigation on almonds: effect of variations in applied water and stress timing on yield and yield components.

Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Moriana, A., Pérez, D., Olmedilla, N., Ribas, F. Fregapane, G. 2007. Influence of different irrigation strategies in a traditional Cornicabra cv olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *Food Chemistry* 100: 568-578.

González-Altozano, P.; Castel, J.R. 2003. Riego deficitario controlado en Clementina: efectos sobre la producción y la calidad de la fruta durante cuatro años. *Span J Agric Res* 1(2), 81-92.

Grattan, S.R., Berenguer, M.J., Connel, J.H., Polito, V.S. Vossen, P.M. 2006. Olive oil production as influenced by different quantities of applied water. *Agriculture Water Management* 85, 133-140.

Herzog, K.M., Häslér, 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.

Iniesta, F.; Testi, L.; Orgaz, F.; Villalobos, F.J. 2009. The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *Eur J Agron* 30, 258-265.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2005. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 80: 177–182.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management*, 83 (1-2): 173–180.

Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2007. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, 26. 49–59.

Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55 (407): 2427–2436.

Kriedemann, P.E.; Goodwin, I. 2011. Regulated Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying., *Irrigation Insights* nº 3. 103 pp. Ed Land & Water Australia

Lassoie, J. 1979. Stem dimensional fluctuations in Douglas-fir of different Crown classes. 1979. *Forest Science* 25 (1), 132-144.

León, L.; De la Rosa, R.; Rallo, L., Guerrero, N.; Barranco, D. 2007. Influence of spacing on the initial production of hedgerow Arbequina olive orchards. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5(4), 554-558.

Marsal J., Mata M., Arbonés A., Rufat J., Girona J., 2002. Regulated deficit irrigation and rectification scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response. *Eur J Agron* 17, 111-122.

Marsal, J., Lopez, G., Girona, J. Pérez Pastor, A. 2008 a. Recent advances in regulated deficit irrigation (RDI) in woody perennials and future perspectives. *Acta Horti* 792, 429-439

Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J. , Girona, J. 2008 b. Evaluation of partial root-zone drying for potential field use as a deficit irrigation technique in commercial vineyards. *Irrig Sci* 26, 347-356

Martínez, J. M. Muñoz, E., Alba, J., Lanzón, A. 1975. Informe sobre utilización del analizador de rendimiento Abencor. *Grasas y Aceites*, 26: 379-385.

Mateu, J. (2007) Breve historia y datos de superficie de las plantaciones en seto o superintensivas. Jornadas Técnicas “Cultivo intensivo versus cultivo superintensivo”. Córdoba, 22 de marzo de 2007

Melgar, J.C., Mohamed, Y., Navarro, C., Parra, M. C., Benlloch, M. 2008. Long-term growth and yield responses of olive trees to different irrigation regimes. *Agr. W. Management* 95: 968-972

Michelakis, N. 1997. Daily stem radius variations as indicators to optimize olive tree irrigation scheduling. *Acta Hort.* 449: 297-304

Michelakis, N., Vouyoucalou, Clapaki, G. 1994. Plant growth and yield of olive tree cv. Kalamon, to different levels of soil water and methods of irrigation. *Acta Horticulturae* 356: 205-214.

Moltz, F.J., and Klepper, B. 1972. Radial propagation of water potential in stems. *Agronomy Journal*, 64:469-473.

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. *Agric. Water Manage.* 84, 290–294.

Moreno, F., Moriana, A., Correl, M., Girón, I., Galindo, A., Torrecillas, A. 2013. Uso de sensores para el registro continuo del estado hídrico de árboles frutales y su aplicación en la programación del riego. IV Seminario Internacional del Uso Racional del Agua (IV USRA), Neiva (Colombia).

Moriana, A and Orgaz, F. 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 128(3):425-431.

Moriana, A. and Fereres, E. 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrig. Sci.* 21: 83-90.

Moriana, A., Corell, M., Giron, I.F., Conejero, W., Morales, D. and Torrecillas, A. 2013. Regulated deficit irrigation based on threshold values of trunk diameter fluctuation indicators in table olive trees. *Science Horticulturae* 164: 102-111.

Moriana, A., Fereres, E. 2004. Establishing references values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Hort.* 664: 407-412.

Moriana, A., Girón, I.F., Martín-Palomo, I.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Torrecillas, A. y Moreno, F. 2010. New approach for olive trees irrigation scheduling using trunk diameter sensors. *Agriculture Water Management* 97: 1822-1828.

Motilva, M.J., Tovar, M.J., Romero, M.P., Alegre, S. and Girona, J. 2000. Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (*Arbequina cultivar*) on oil yield and oil composition during the fruit ripening period. *J Sci Food Agric* 80: 2037-2043.

Msalem, Houssen Edine. 2014. Influencia del riego y del estado de carga sobre algunos parámetros fisiológicos del olivo durante la fase de reposo invernal. Tesis Doctoral Universidad de Córdoba.

Navarro Velasco, A. 1961. La nueva olivicultura italiana y su aplicación en España. Instituto de Estudios Jienenses. Pp 56-70.

Nogués, S. and Baker, N. 2000. Effects of drought on photosynthesis in Mediterranean plants grown under enhanced UV-B radiation. *J. Exp. Bot.* 51(348):1309-1317.

Orden 32/2004, de 8 de octubre, por la que se aprueba la denominación de origen protegida "Aceite de La Rioja" y su reglamento, con el carácter transitorio que se establece en el reglamento (CE) del Consejo 2.081/92.

Orgaz, F. and Fereres, E., 2001. Riego. En: El cultivo del olivo. 4ª Ed.D. Barranco, R. Fernández-Escobar y L. Rallo (Eds) 724 pp. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Orgaz, F., Villalobos, F., Testi, L., Pastor, M., Hidalgo, J.C., Fereres, C. 2005. Programación de riegos en plantaciones de olivar. En: Cultivo del Olivo con riego localizado. Miguel Pasto Muñoz-Cobo (Ed). 784 pp. Ediciones Mundi Prensa. Madrid.

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., Casadeus, J.,

Bonany, J. and Torrecillas, A. 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives, *Agriculture Water Management* 97: 1-11,

Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Conejero, W, Mounzer, O., Brito, J.J., García-Orellana, Y. 2004. Uso de medidas continuas del estado hídrico de la planta para la programación del riego. *Riegos y Drenajes XXI*, 45, 40-45

Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2004. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science*, 167: 275–280.

Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2004a. Comparison of continuously recorded plant based water stress indicators for young lemon trees. *Plant and Soil*, 267: 263–270.

Ortuño, M.F., Brito, J.J. Conejero, W., García Orellana, Y., Torrecilla, A. 2009.a. Using continuously recorded trunk diameter fluctuations for estimating water requirements of lemon trees. *Irrigation Science* 27: 271-276

Ortuño, M.F., Brito, J.J. Conejero, W., García Orellana, Y, Torrecilla, A. 2009b. Assessment of daily trunk shrinkage signal intensity threshold values for deficit irrigation of lemon trees *Agriculture Water Management* 96: 80-86.

Ortuño, M.F., Brito, J.J. Conejero, W., García Orellana, Y, Torrecilla, A. 2009c. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential equations for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* 27: 121-127.

Palese, A.M., Nuzzo, V., Favati, F. Pietrafesa, A. 2010. Effects of water deficit on vegetative response, yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L. cv. Coratina) grown under intensive cultivation. *Sci. Hortic.*125: 222-229.

Pastor, M, Hidalgo, J.C., Vega, V., Fereres, E. 2006. Densidades de plantación en olivares de regadío. El caso de las plantaciones superintensivas de Andalucía. *Fruticultura Profesional Especial Olivicultura IV* N° 160: 7-11.

Pastor, M., Castro, J., Mariscal, M.J., Vega, V., Orgaz, F.; Fereres, E., Hidalgo, J. 1999. Respuesta del olivar tradicional a diferentes estrategias y dosis de agua de riego. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* Vol. 14(3): 393-404.

Pastor, M.; Humanes, J.; Vega, V.; Castro, J. 1998. Diseño y manejo de plantaciones de olivar. Ed. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.

Patumi, M., d'Andria, R., Marsilio, V., Fontanazza, G., Morelli, G., Lanza, B. 2002. Olive and olive oil quality after intensive monocone olive growing (*Olea europaea* L., cv. Kalamata) in different irrigation regimes. *Food Chemistry*, 77: 27-34

Patumi, M., d'Andria, R., Fontanazza, G., Morelli, G., Giorio, P., & Sorrentino, G. (1999). Yield and oil quality of intensively trained trees of three cultivars of olive (*Olea europaea* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 74, 729–737.

Peña, J.M., Arbizu, J., Muñoz-Guerra, L.M. 2007. Experiencias de abonado con inhibidores de la nitrificación DMPP en olivo en cultivo superintensivo. *Actas de las II Jornadas de Fertilización de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas*. Logroño, 27 al 29 de noviembre de 2007.

Pereira, L.S., Oweis, T. y Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57: 175–206.

Pérez-López, D., Moriana, A., Rapoport, H., Olmedilla, M., Ribas, F. 2008. New approach for using trunk growth rate and endocarp development in the irrigation scheduling of young olive orchards. *Science Hort.* 115: 244,251.

Pérez-Pastor A., Domingo R., Torrecillas A., Ruiz-Sánchez M.C., 2009. Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. *Irrig Sci* 27, 231-242.

Rallo, L. (2007) La intensificación de la olivicultura. *Jornadas Técnicas "Cultivo intensivo versus cultivo superintensivo"*. Córdoba, 22 de marzo de 2007.

Ramos, A., Santos, F. L. 2010. Yield and olive oil characteristics of a low-density orchard (cv. Cordovil) subjected to different irrigation regimes. *Agric. Water Manage.* 2010, 97, 363–373.

Reglamento (CE) nº 702/2007 de la Comisión de 21 de junio de 2007 por el que se modifica el Reglamento (CEE) nº 2568/91 relativo a las características de los aceites de oliva y de los aceites de orujo de oliva y sobre sus métodos de análisis.

Rius, X. 2005. Apuntes de Viticultura Australiana. Agrolatino, Barcelona. pp:445.

Rius, X. 2007. Programación de riegos en el olivar. Olint, Mayo 2007:10-15.

Ruiz-Sánchez M.C., Egea J., Galego R., Torrecillas A., 1999. Floral biology of Bulida apricot trees subjected to postharvest drought stress. *Ann Appl Biol* 135, 523-528.

Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Castel, J.R. 2010. Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8(S2), S5-S20.

Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A., Domingo, R. 2000. Regulated deficit irrigation in apricot trees. *Acta Horticulturae*, 537:759–766.

Santos, A.; Lizar, B.; Garnica, J.J. 2008. Guía práctica para las nuevas plantaciones de olivo. *Navarra Agraria Noviembre-Diciembre 2008*, 29-32

Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, and R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Trans. ASAE* 50:1031–1035.

Selles, G., Ferreira, R. Selles, I., Lemus, G. 2006. Efecto de diferentes regímenes de riego sobre la carga frutal, tamaño de la fruta y rendimiento del olivo cv. Sevillana. *Agricultura Técnica (Chile)* 66(1):48-56.

Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J. y Huguet, J. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 44: 615–621.

Tognetti, R., D'Andria, R., Lavini, A. and Morelli, G. 2006. The effect of deficit irrigation on crop yield and vegetative developmet of *Olea europaea* L. (cv Frantoio and Leccino). *Europ J Agronomy* 25, 356-364

Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R., Ruiz-Sánchez M.C. 2000. Almond tree response to irrigation withholding at different periods. *Sci Hortic* 85, 201-215.

Tous, J., Romero, A. y Plana, J. 2003. Plantaciones superintensivas en olivar. Comportamiento de 6 variedades. *Agricultura*, 851: 346-350.

Tovar, M.J., Motilva, M.J., Romero, M.P. 2001. Changes in the phenolic composition of virgin olive oil from young trees (*Olea europaea* L. cv. Arbequina) grown under linear irrigation strategies. *J Agric Food Chem.* 49(11):5502-8

Tovar, M.J., Romero, M.P., Alegre, S., Girona, J., Motilva, M.J., 2002. Composition and organoleptic characteristics of oil from Arbequina olive (*Olea europaea* L.) trees under deficit irrigation. *J. Sci. Food Agric.* 82, 1755–1763.

Xiloyannis, C., Dichio, B., Nuzzo, V., Celano, G. 1996. L'olivo: pianta esempio per la sua capacità di resistenza in condizioni di estrema siccità. *Seminari di Olivicoltura*. Spoleto, 7 and 28 June. pp. 79-111.

Xiloyannis, C., Dichio B., Sofo, A., Palese, A.M. 2004. Capacidad de adaptación del olivo a los ambientes áridos. *L'Informatore Agrario* 40/2004: 43-45.