



Programación de riego deficitario controlado mediante extrapolación de líneas base de referencia de sensores de diámetro de tronco en olivar de mesa (Cv Manzanilla de Sevilla).



AUTORA DEL PROYECTO: María José Vargas Pacheco.

Directores:

Mireia Corell González.

Félix Moreno Lucas.

Titulación: Ingeniería Técnica Agrícola Especialidad en Explotaciones Agropecuarias y Hortofruticultura y Jardinería.

Abril 2014

ÍNDICE.

1. RESUMEN	7
2. INTRODUCCIÓN.....	9
2.1. Importancia del cultivo del olivo.....	9
2.1.1. El cultivo del olivo en el mundo.....	9
2.1.2. El cultivo del olivo en España.....	10
2.1.3. Producción de aceituna de mesa en España y Andalucía.....	10
2.2. Botánica y morfología.....	11
2.3. Estrés hídrico.....	13
2.3.1. Efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento y desarrollo.....	14
2.3.2. Efectos del estrés hídrico sobre el estado hídrico de la planta.....	16
2.3.3. Efectos del estrés hídrico sobre la fotosíntesis.....	16
2.3.4. Resistencia del olivo a la sequía.....	17
2.4. Programación del riego en el olivo.....	18
2.5. Riego deficitario en olivo.....	19
2.5.1. Indicadores del estado hídrico del cultivo.....	21
2.5.2. La variación del diámetro del tronco usada para la mejora del manejo de agua aplicada.....	22
2.5.6. El uso de las líneas base como herramienta del manejo de agua aplicada.....	25
3. OBJETIVOS.....	28
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	29
4.1. Descripción de la finca.....	29
4.1.1. Situación.....	29
4.1.2. Clima.....	29
4.1.3. Suelo.....	30
4.1.4. Medidas meteorológicas.....	30
4.2. Descripción de la parcela y diseño experimental.....	31
4.2.1. Tratamientos de riego.....	32
4.3. Parámetros estudiados.....	37
4.3.1. Crecimiento de ramos, número de inflorescencias y frutos.....	37
4.3.2. Potencial hídrico.....	38
4.3.3. Conductancia estomática.....	39
4.3.4. Variaciones del diámetro del tronco mediante dendrómetros.....	40

4.4. Cosecha y calidad	41
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	43
5.1. Análisis climatológico	43
5.2. Crecimiento y desarrollo	47
5.3. Relaciones hídricas	51
5.4. Producción y calidad	61
6. CONCLUSIONES	63
7. BIBLIOGRAFÍA	64

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Efectos del estrés hídrico en los procesos de crecimiento y producción del olivo.....	20
Tabla 2. Coeficientes de cultivo en olivo adaptados a la zona	35
Tabla 3. Cantidad de agua aportada a los dos tratamientos diferentes incluyendo también la ETc del cultivo en las tres fases del estudio realizado en Coria del Río en 2012.	35
Tabla 4. Descripción de las clases de aceitunas en función de su estado de madurez	42
Tabla 5. Número de inflorescencias e infrutescencias medias en el periodo de estudio en el año 2012.....	49
Tabla 6. Valores medios de la tasa de crecimiento diaria en las diferentes fases de los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.....	56
Tabla 7. Valores medios de la tasa de crecimiento acumulada en las diferentes fases de los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.....	57
Tabla 8. Valores medios de la máxima contracción diaria en las diferentes fases de los dos tratamientos de riego realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.....	59
Tabla 9. Medias de la producción (Kg/árbol y Kg/ha), y calidad: escandallo (número de frutos por Kg) e Índice de madurez de los frutos (I.M.) y agua aplicada (mm) en los tratamientos de riego (RDC y Control) durante el verano 2012.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Distribución de la producción mundial de olivar por regiones	10
Figura 2. Distribución de la producción nacional de aceituna de mesa	11
Figura 3. Sensibilidad de diversos procesos fisiológicos de las plantas al estrés hídrico.	15
Figura 4. Esquema de dos ciclos diarios de expansión y contracción.....	23
Figura 5. Relación entre Potencial hídrico foliar y máxima contracción diaria.	26
Figura 6. Esquema de dos ciclos diarios de expansión y contracción.....	32
Figura 7. Línea base de referencia para Manzanilla de Sevilla y ajuste de la línea base de referencia	34
Figura 8. Agua aplicada en cada uno de los dos tratamientos de riego durante las tres fases de estudio.....	36
Figura 9. Marcadores de ramos y Medida diámetro longitudinal del fruto.	38
Figura 10. Cámara de presión.	38
Figura 11. Hoja envuelta en papel de aluminio y Medida del potencial hídrico.	39
Figura 12. Medida de conductancia estomática.....	40
Figura 13. Bobina del dendrómetro y aguja, detalle de la colocación en el árbol del sensor....	41
Figura 14. Las cinco primeras fases del desarrollo del color de la piel en la aceituna: Índice de madurez.	42
Figura 15. Temperaturas máximas y mínimas (°C) registradas en Coria del Río en el año 2012.	43
Figura 16. Humedad relativa media y humedad relativa media (%) registradas en Coria del Río en el año 2012.....	44
Figura 17. ETo y precipitación registrados en Coria del Río en el año 2012.....	45
Figura 18. ETc calculada y déficit de presión de vapor registrada en Coria del Río en el año 2012.....	46
Figura 19. Humedad del suelo registrada en los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.....	47
Figura 20. Variación del crecimiento de los ramos (cm) de los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.	48
Figura 21. Evolución del tamaño del fruto (cm) en los tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.....	50
Figura 22. Evolución del volumen del fruto (mg) de los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.....	51
Figura 23. Potencial hídrico (MPa) registrado en los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.	52
Figura 24. Evolución de la conductancia estomática máxima (cm/s) en los tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río en el verano de 2012.	54
Figura 25. Tasa de crecimiento de los tratamientos aplicados, en Coria del Río, en el periodo de durante el verano 2012.....	55
Figura 26. Tasa de crecimiento acumulada de los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.....	57
Figura 27. MCD de los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.....	58

Figura 28. Señal MCD en los tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012. 59

Figura 29. Relación entre la MCD estimada y la MCD calculada en la fase de endurecimiento masivo del hueso en el tratamiento de riego deficitario. 61

1. RESUMEN.

El objetivo esencial de este trabajo es comprobar si es posible el manejo de la programación de riego en el olivar de mesa con el empleo exclusivo de la variación de diámetro del tronco, imponiendo condiciones de estrés hídrico en la fase de endurecimiento del hueso, considerando el uso de líneas base de referencia.

El estudio se ha llevado a cabo en la finca experimental “La Hampa” ubicada en Coria del Río, municipio sevillano situado en el bajo del Guadalquivir, caracterizado por un clima templado, Mediterráneo con inviernos suaves y veranos calurosos.

El olivar estudiado está constituido por árboles de 43 años de edad, del cultivar Manzanilla de Sevilla, con un marco de plantación de 7 x 7 m.

El tratamiento de Riego deficitario controlado (RDC) se planteó en función de la tasa de crecimiento del tronco (TCT) y la Máxima contracción diaria (MCD). Se diferenciaron tres periodos, Fase I: desde el inicio del riego hasta el endurecimiento masivo del hueso ($TCT \leq 20 \mu\text{m día}^{-1}$); Fase II: inicio del endurecimiento del hueso (señal de la máxima contracción diaria ≤ 0.75); Fase III: rehidratación desde finales de Agosto hasta la cosecha ($TCT \leq -5 \mu\text{m día}^{-1}$).

Los árboles con RDC mostraron un estrés moderado, evidenciados en las medidas de potencial hídrico de tallo, conductancia estomática, sin afectar significativamente al crecimiento. El estado hídrico del cultivo se recuperó con el riego de rehidratación mejorando todos los parámetros fisiológicos estudiados.

Se analizaron el número de inflorescencias por ramo, el número de frutos por inflorescencias, el volumen del fruto, producción (kg árbol^{-1}), índice de madurez y escandallo. Los resultados no indicaron diferencias entre el tratamiento Control y el RDC. La producción y la calidad de los frutos resultó similar en ambos tratamientos. Se apreció en un segundo año de tratamiento, una ligera disminución en la carga en RDC que podría tener un efecto beneficioso a largo plazo, disminuyendo la vecería, probablemente vinculado a la leve disminución del crecimiento que ocasiona el estrés hídrico moderado, pero que no afectó a la inducción floral.

De los resultados obtenidos no parece que la señal MCD sea capaz de mostrar diferencias entre arboles con un estado de estrés hídrico moderado y un control bien regado. En esta situación la TCT mostró mayor sensibilidad.

Consideramos necesarios estudios sucesivos para afianzar los resultados y poder observar si el estrés hídrico provoca una merma de crecimiento y producción en árboles sometidos a este régimen hídrico deficitario de manera reiterada.

2. INTRODUCCIÓN.

2.1. Importancia del cultivo del olivo.

El olivo es originario de la zona del Caúcaso, extendiéndose por Chipre, Egipto hasta llegar a países del Mediterráneo y actualmente se sitúa entre las latitudes 30º y 45º del hemisferio norte y del hemisferio sur, en regiones climáticas del tipo Mediterráneo que tienen un invierno suave y un verano largo, seco y caluroso (Barranco *et al.*, 2008).

El cultivo del olivo tiene dos objetivos primordiales: la producción de aceite y la producción de aceituna de mesa. A continuación se realiza una breve descripción de este cultivo en el mundo como en España y ya dentro de España en Andalucía como comunidad autónoma en la que hemos realizado esta investigación.

2.1.1. El cultivo del olivo en el mundo.

El área cosechada de aceituna en el mundo ocupa una superficie aproximada de 10 millones de hectáreas según la FAO (2011), situándose la mayor parte de esta en los países de la cuenca Mediterránea.

La producción media de aceituna en el mundo es aproximadamente de 17 millones de toneladas de aceitunas, de las que alrededor de un 90% son destinadas a la obtención de aceite de oliva y el 10% se destina al consumo como aceituna de mesa (FAO, 2011). Europa (España, Italia y Grecia como mayores productores) producen prácticamente la mitad de la producción mundial (Fig. 1), África (con Marruecos, Túnez, Egipto, Argelia a la cabeza de la producción) con prácticamente un tercio y Asia (con Turquía, Siria y Jordania como mayores productores) con un 19% de la producción mundial en 2011.

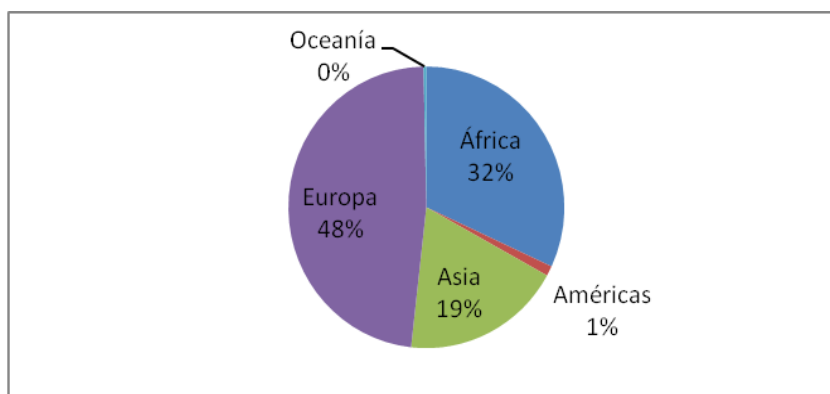


Figura 1. Distribución de la producción mundial de olivar por regiones (FAO 2011).

2.1.2. El cultivo del olivo en España.

España es uno de los principales países de la cuenca Mediterránea, en superficie dedicada al cultivo del olivo y en producción de aceituna, que se extiende por toda la península ibérica, exceptuando comunidades autónomas como Galicia, Asturias y Cantabria.

Según los datos del Anuario de Estadística Agraria (MAGRAMA, 2011), España cuenta con 2.475.466 hectáreas de olivar, de las cuales 166.066 ha corresponden a olivar de aceituna de mesa, es decir, el 7%. Por comunidades autónomas, casi la totalidad de la superficie de olivar español de aceituna de mesa se encuentra entre las comunidades de Andalucía, donde se cultiva el 61% y Extremadura, con el 37% (MAGRAMA, 2011).

2.1.3. Producción de aceituna de mesa en España y Andalucía.

Los últimos datos de producción mundial de aceituna de mesa ascendieron a 2.440.000 toneladas para la campaña 2011/2012. España es la principal productora y comercializadora de aceituna de mesa a nivel mundial, seguido a mucha distancia de otros países de la Cuenca Mediterránea. España encabeza este ranking con una producción de 482.100 t, lo que representa un 20% de la producción mundial de aceituna de mesa, seguida por Turquía (330.000 t).

La producción andaluza de aceituna de mesa representa el 80% de la producción nacional (Fig. 2), siendo ésta un tercio de la producción mundial (FAO, 2011). En los

últimos años se ha mantenido una tendencia claramente creciente de la producción de aceituna para aderezo (MAGRAMA, 2011).

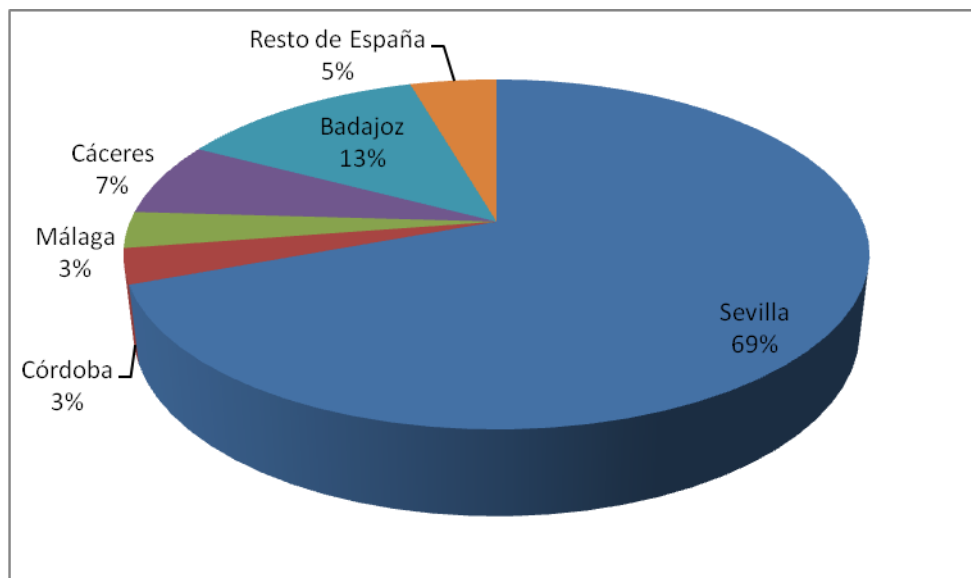


Figura 2. Distribución de la producción nacional de aceituna de mesa (MAGRAMA 2011).

El olivar en regadío viene aumentando considerablemente en las tres últimas décadas, ocupando en la actualidad aproximadamente el 21% de la superficie dedicada al regadío, ocupando el segundo lugar solo detrás de los cereales. Y seguido del viñedo, cítricos y el resto de los frutales.

En la actualidad el 30% del olivar se encuentra en regadío, con una superficie de 690.467 ha en el año 2012 (MAGRAMA 2013) en la que se aplica en un 95% técnicas de riego localizado.

2.2. Botánica y morfología.

El olivo (*Olea europaea* L.) pertenece a la familia botánica *Oleaceae*, que comprende especies de plantas distribuidas por las regiones tropicales y templadas del mundo. De los 29 géneros de esta familia, el olivo pertenece al género *Olea* y es la única especie dentro de la familia *Oleaceae* con fruto comestible (Rapoport, 2008).

El olivo cultivado es un árbol de mediano tamaño (de 4 a 8 metros de altura), su tronco es grueso y de corteza de color gris a verde grisáceo. Su copa es redondeada y normalmente bastante densa.

El olivo es un árbol polimórfico, con fases juvenil y adulta. Las diferencias en estas fases se manifiestan en el potencial para el enraizamiento (fase juvenil) y la capacidad reproductora (fase adulta).

La morfología del sistema radical depende del origen del árbol. En árboles nacidos de semillas, se forma una raíz principal, que domina el sistema radical durante los primeros años sin aparición de raíces laterales importantes. Los árboles comerciales, producidos en su mayoría por estaquillas, forman en la zona basal múltiples raíces adventicias, muchas de las cuales se comportan como raíces principales del árbol (Rapoport *et al.*, 2008).

Las hojas del olivo son persistentes y normalmente sobreviven de dos a tres años. Son simples, de forma lanceolada y con bordes enteros. El limbo tiene una longitud entre 3 y 9 cm y una anchura entre 1-1,8 cm. El peciolo es corto y en cada nudo aparecen dos hojas opuestas y con disposición decusada (Rapoport, 2008).

Las inflorescencias son de forma paniculada, con un eje central del que salen ramificaciones, que a su vez, también pueden ser ramificadas. En las ramificaciones de las inflorescencias las flores se forman aisladas o en grupos de tres o cinco. Las flores son pequeñas y con simetría regular. El cáliz es un pequeño tubo de color blanco verdoso y la corola está compuesta por cuatro pétalos blanco-amarillentos y dos estambres. Su fruto, es de tipo drupa, pequeño y de forma elipsoidal a globosa con unas dimensiones de 1 a 4 cm de longitud y de 0,6 a 2 cm de diámetro, según variedades. Está constituido por el endocarpo (hueso), mesocarpo (pulpa o carne) y el exocarpo (piel). En el interior del hueso encontramos la semilla (Rapoport, 2008).

Existen 2000 cultivares de olivo clasificados a nivel mundial, de las que se cultiva a gran escala un pequeño grupo entre los que se encuentra el cultivar Manzanilla de Sevilla (Barranco *et al.*, 2012). Que es una de las variedades más difundidas internacionalmente por su productividad y la calidad de su fruto. Los arboles de Manzanilla de Sevilla tiene un vigor reducido y se caracterizan por su precocidad en la entrada en producción. Es una variedad de frutos grandes de color verdes y púrpuras,

con una elevada relación pulpa/hueso y un aceptable contenido en aceite cuando se destina a molino (Barranco, 2008).

2.3. Estrés hídrico.

El estrés hídrico se puede definir como el estado en el cual la demanda de agua por la planta supera a la capacidad de suministro por las raíces. La demanda de agua está determinada por la transpiración, fenómeno dependiente de variables físicas como radiación, temperatura y humedad relativa. Estas condiciones de estrés se dan, por tanto bajo condiciones de baja disponibilidad de agua en el suelo o bien de alta demanda evaporativa (altas temperaturas, muy baja humedad relativa del aire). En un estrés hídrico al que puede estar sometida la planta se produce una desestabilización inicial de las funciones, seguida de un proceso de adaptación y de normalización y una mejora de la resistencia a esas condiciones adversas. Sin embargo, si se exceden los límites de la tolerancia y se sobrepasa la capacidad de aclimatación, el resultado puede ser un daño permanente o incluso la muerte. A esta definición habría que añadirle el concepto de regeneración, esto es, la capacidad de la planta para volver al estado original cuando ha cesado el agente estresante (Lichtenthaler, 1996).

Los factores que pueden causar estrés sobre la vegetación terrestre se pueden clasificar como sigue (Lichtenthaler, 1996):

1. Factores naturales abióticos:

- Radiación (deficiencia o exceso).
- Temperatura (deficiencia o exceso).
- Agua (deficiencia o exceso).
- Naturaleza química: salinidad, deficiencias/excesos minerales, pH, ozono, etc.
- Otros: heridas, viento, presión, etc.

2. Factores naturales bióticos:

- Patógenos: virus, hongos y bacterias.
- Animales: pastoreo, pisoteo, insectos.
- Otras plantas: parasitismo, alelopatía, competencia.

3. Factores antropogénicos (inducidos por la actividad humana):

- Polución atmosférica.
- Contaminación de suelos y aguas.
- Compactación, salinización y desecación de suelos.

Desde un punto de vista ecofisiológico, se entiende por estrés hídrico cualquier limitación al funcionamiento óptimo de la planta impuesta por su insuficiente disponibilidad de agua. El estrés hídrico es el factor ambiental que más limita la producción agrícola a escala mundial. Existe una elevada correlación entre la productividad de los diferentes ecosistemas y su precipitación característica (Lambers *et al.*, 1987). A escala mundial, se estima que el rendimiento potencial de los cultivos se reduce en más del 70% debido a las limitaciones ambientales. De ese porcentaje, el estrés hídrico en la vegetación natural y cultivada se observan durante los meses de Julio, Agosto y Septiembre, dependiendo de la climatología anual (Informe de Medio Ambiente de Andalucía, 2012).

Puesto que el agua tiene un papel esencial en la fisiología de las plantas, el estrés hídrico afecta a la mayor parte de sus funciones vitales. Así por citar algunos ejemplos, en condiciones de sequía disminuye la capacidad de germinación de las semillas, se reduce la absorción de nutrientes minerales y la producción de grano y frutos, y en algunos casos aumenta la predisposición de las plantas a sufrir enfermedades.

2.3.1. Efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento y desarrollo.

Como se ha indicado anteriormente, el efecto más inmediato de un estrés hídrico suave es la reducción del crecimiento (Mohr Y Schopfer, 1995). La expansión celular es muy sensible al estrés, un descenso externo del potencial hídrico de solo -0.1 MPa (a veces menos) puede producir ya un descenso perceptible en el crecimiento (Salisbury y Ross, 1991). La base de esta disminución es, en primera instancia, puramente física, como consecuencia de la disminución de la presión de turgencia celular, fuerza necesaria para la expansión celular (Fig. 3).

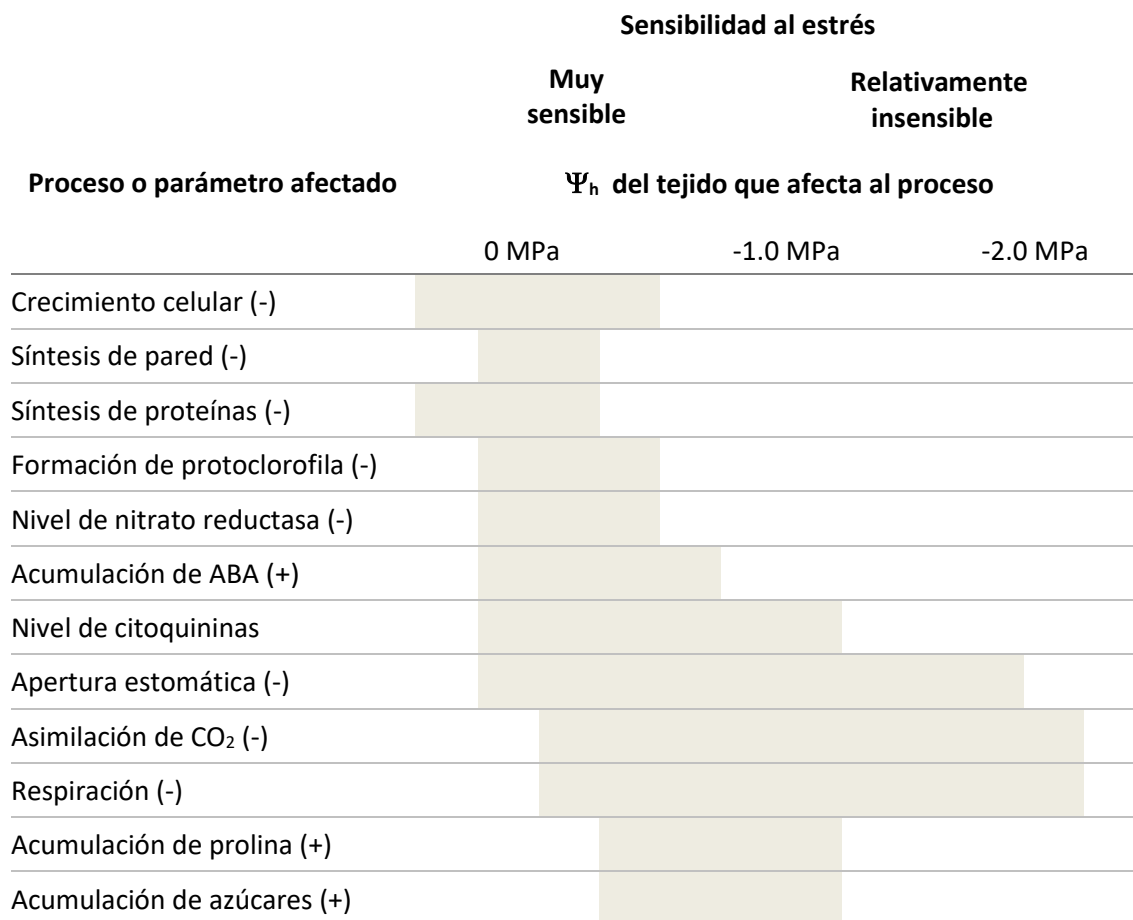


Figura 3. Sensibilidad de diversos procesos fisiológicos de las plantas al estrés hídrico.

La suspensión del riego reduce la expansión foliar, el crecimiento del tallo y de las raíces, y cuando el déficit es severo se acelera la senescencia de hojas maduras (Parra *et al.*, 1999). El descenso en la tasa de crecimiento constituye una adaptación de las especies a la sequía, por medio de la cual reducen el área foliar y la superficie evaporativa mientras exista poca disponibilidad de agua en la rizosfera (Schulze, 1986). Los efectos más significativos de la menor disponibilidad hídrica a nivel morfológico son: reducción de la altura de la planta, diámetro del cuello, biomasa, etc., cambios que se observan tanto en especies herbáceas como leñosas (Mori *et al.*, 1995; Farooqi *et al.*, 1998).

2.3.2. Efectos del estrés hídrico sobre el estado hídrico de la planta.

El déficit hídrico altera los parámetros hídricos de la hoja y por ello, los métodos habituales para estudiar el estado hídrico de la planta consisten en determinar en las hojas el contenido hídrico relativo (RWC), el potencial hídrico (Ψ_h) y sus componentes (potencial osmótico, Ψ_o y potencial de turgencia, Ψ_p).

Es posible establecer una gradación en la sensibilidad de diferentes procesos fisiológicos al estrés hídrico, definido por el potencial hídrico del tejido (Hsiao, 1973).

La determinación del potencial hídrico de la planta mediante la medida de la presión xilemática es un buen indicador del estado hídrico de la planta (Ferreyra *et al.*, 2001).

El potencial hídrico medido al mediodía solar está influenciado por las condiciones climáticas, y suele ser el más bajo con la máxima iluminación diurna.

El ajuste osmótico es un mecanismo de adaptación que contribuye a la tolerancia al estrés hídrico y consiste en la habilidad de las plantas para sintetizar solutos compatibles de bajo peso molecular que se acumulan en grandes concentraciones sin afectar al metabolismo celular. Este mecanismo permite reducir el potencial osmótico para mantener la absorción de agua y el potencial de turgencia alto y, por tanto, la continuación del crecimiento. Además facilita conductancias estomáticas más altas a potenciales hídricos más bajos (Turner y Jones, 1980; Parra, 1999; Morgan, 1984). En general el límite de ajuste osmótico varía con las especies, pero puede estar en torno a -2 MPa (Hanson y Hitz, 1982).

En olivo se ha estudiado el ajuste osmótico en hoja y fruto en el cultivar “Manzanilla de Sevilla”, en un año de descarga, con pocos frutos que compitan por asimilados y agua, el potencial osmótico en hoja, mostró valores menores que en fruto, permitiendo así un mayor crecimiento vegetativo (Dell’Amico *et al.*, 2013).

2.3.3. Efectos del estrés hídrico sobre la fotosíntesis.

En el modelo generalmente aceptado, la limitación inicial de la fotosíntesis foliar en situaciones de estrés hídrico, es esencialmente estomática y no afecta a la capacidad fotosintética de la hoja (Medrano *et al.*, 2002). La asimilación disminuye al

descender la concentración intercelular de CO₂ (C_i) al reducirse la conductancia estomática. El cierre estomático es inicialmente hidropasivo cuando disminuye el contenido hídrico relativo de la hoja. Después es hidroactivo, al entrar en acción el control estomático mediado por el ácido abscísico si la situación de déficit continua. Si la situación de estrés continúa, además de la limitación estomática, puede ponerse en evidencia una limitación metabólica que sí afecta a la capacidad fotosintética debido a alteraciones en el funcionamiento del cloroplasto. Estudios más recientes sugieren que este modelo no es general puesto que existen diferencias significativas en el comportamiento foliar en distintos tipos de mesófitas C₃ (Lawlor y Cornic, 2002). Mientras que en unas especies se observa que la capacidad fotosintética (limitación metabólica) no se afecta hasta que el contenido hídrico relativo se reduce en 25-30%, en otras, este tipo de limitación se puede poner en evidencia ante descensos mínimos en el RWC. Esta discrepancia podría ser un reflejo de la diferente capacidad de tolerancia y adaptación a la sequía en distintas especies.

2.3.4. Resistencia del olivo a la sequía.

El olivar se ha cultivado tradicionalmente en condiciones de secano adaptado al clima mediterráneo, con producciones aceptables y capacidad de sobrevivir a periodos de intensa sequía gracias a su adaptación y la morfología (Orgaz y Fereres, 2008).

El olivo es un árbol protegido para la sequía:

- La morfología del sistema radicular es extensa y vigorosa (Fereres 2012). La mayor parte de las raíces se pueden encontrar en el primer metro de profundidad del suelo, aunque pueden ocupar los 2 o 3 metros de profundidad en suelos aluviales.
- La morfología foliar minimiza la radiación recibida: por el tamaño pequeño de sus hojas, por una alta reflectividad de la radiación y por su posición vertical (Connor 2005).
- Las hojas son coriáceas y su estructura anatómica sirve en muchos aspectos para su adaptación a ambientes de alta transpiración. La pérdida de agua a través de los estomas no solo se regula por el mecanismo de abertura y cierre de los estomas en función de la disponibilidad de agua y DPV, también por su localización exclusiva en la superficie inferior de la hoja (Barranco *et al.*, 2008),

y la protección que le otorga una densa capa de tricomas en el envés de la hoja (Connor 2005).

- El olivo mantiene un balance delicado entre fotosíntesis y transpiración, y muestra la máxima apertura estomática en las horas primarias del día. Este comportamiento tiene un gran valor a la hora de la adaptación a las condiciones limitantes de agua, puesto que en las primeras horas de la mañana el déficit de presión de vapor es mínimo (inversamente proporcional a la conductancia estomática).
- El cierre parcial de los estomas supone tasas de fotosíntesis en el olivo menores que en otros cultivos herbáceos, pero que se ven compensadas con la naturaleza perenne del olivo (Orgaz y Fereres, 2008).
- La reducción de la transpiración en las horas del día con mayor demanda evapotranspirativa, junto a la regulación osmótica, permite al olivo disminuir su potencial hídrico hasta valores de -8 MPa en condiciones de sequía extrema, siendo capaz de tomar agua del suelo por debajo del punto de marchitez permanente (Orgaz y Fereres, 2008).

2.4. Programación del riego en el olivo.

El objetivo principal del riego es evitar que el contenido de agua del suelo alcance un nivel umbral por debajo del cual el cultivo pueda sufrir estrés hídrico y la producción se vea reducida. A pesar de su resistencia a la sequía, el olivar responde de una forma muy importante al riego, y lo que es más importante, a dosis de agua relativamente pequeñas en comparación con otras especies como las hortícolas (Mariana *et al.*, 2006) por lo que es necesario un buen manejo del riego. La programación del riego de los frutales se suele realizar en base al balance de agua, con la estimación de la evapotranspiración del cultivo y teniendo en cuenta la capacidad de retención de humedad del suelo.

Orgaz *et al.*, 2006 desarrollaron un modelo específicamente para olivar que permite integrar en el coeficiente de cultivo tanto el tamaño de la planta, como la evapotranspiración, lo que permite una mejora considerable de la estimación de las necesidades de agua. Es necesario calcular la evapotranspiración de referencia (ETO) y

tener en consideración los valores de coeficiente de cultivo (K_c) y el coeficiente reductor (K_r) dependiente del sombreado del suelo (Orgaz y Fereres, 2008).

Este modelo está ajustado al manejo del agua en condiciones de ausencia de estrés hídrico. Sin embargo, cada vez son más frecuentes las restricciones de agua para el riego, especialmente para cultivos como el olivar, que debido a su capacidad de resistencia suele tener las menores dotaciones disponibles. Esto ha supuesto que cada vez más se riegue de forma deficitaria, es decir, por debajo de las necesidades teóricas del cultivo. En estas condiciones las estimaciones de las necesidades de riego en base a balances de agua o modelos de cultivo no son válidas. De aquí que la percepción de los agricultores, que habitualmente riegan con dotaciones de agua muy deficitarias, sea que el modelo de Orgaz *et al.*, 2006 incluido en herramientas muy populares de manejo del riego, estima necesidades de riego “excesivas y alejadas de la realidad”.

2.5. Riego deficitario en olivo.

El riego deficitario controlado es una técnica de programación que se desarrolló a comienzos de los 80 en melocotón (Chalmers *et al.*, 1985). Este sistema de programación del riego se basa en la existencia de estados fenológicos de la planta más resistentes a las condiciones de estrés hídrico y que, por lo tanto, nos permitirían disminuir la cantidad de agua a aplicar sin afectar, o disminuyendo muy poco, la producción.

La limitación de agua puede afectar al vigor y a la productividad del árbol. El déficit hídrico puede tener diferente repercusión en el árbol según el estado fenológico en el que se encuentre el cultivo en el momento en el que ocurra. En la tabla 2 podemos observar cómo afecta el estrés hídrico a cada estado fenológico del olivo.

Tabla 1. Efectos del estrés hídrico en los procesos de crecimiento y producción del olivo (Orgaz y Fereres, 2008).

Proceso	Período	Efecto del Déficit Hídrico
Crecimiento vegetativo	Todo el año	Reducción del crecimiento y número de flores al año siguiente
Desarrollo de yemas florales	Febrero- Abril	Reducción del número de flores y aborto ovárico
Floración	Mayo	Reducción de la fecundación
Cuajado de frutos	Mayo - Junio	Disminuye la cosecha actual
Crecimiento inicial del fruto	Junio - Julio	Disminuye el tamaño del fruto
Crecimiento posterior del fruto	Agosto - Cosecha	Disminuye el tamaño del fruto
Acumulación de aceite	Julio - Noviembre	Disminuye el contenido en aceite del fruto

Es importante diferenciar estos efectos cuando se decide aplicar las técnicas de riego deficitario. Goldhamer (1999) describe por primera vez la técnica de riego deficitario en olivar de aceituna de mesa, en dicho estudio restringe el agua aportada durante el endurecimiento masivo del hueso llegando a reducir la aplicación hasta un 25% de la evapotranspiración del cultivo (ETc) sin disminuir de forma significativa la cosecha. Por otro lado, Moriana *et al.*, (2003) describen en aceituna de almazara una gran pérdida de cosecha con niveles de estrés hídrico moderados durante la floración (valores de potencial hídrico al mediodía inferiores a -1,5 MPa). Finalmente, Lavee y Wonder (1991) describieron una disminución en la acumulación de aceite con un estrés severo durante la fase de acumulación. Es decir, se podrían diferenciar tres fases especialmente importantes a tener en cuenta en el cultivo del olivo en nuestras condiciones:

- **Floración y cuajado:** este estado fenológico es muy sensible al estrés hídrico, puede provocar la caída de flores. En este estado no es común sufrir estrés hídrico en nuestra zona ya que las precipitaciones primaverales coinciden con esta fase.
- En la fase de **endurecimiento masivo del hueso** es la fase más resistente, en la que la reducción del riego puede ser muy elevada. En algunos trabajos recientes se ha eliminado el riego en esta fase y no se afectó a la cosecha (Moriani *et al.*, 2013).
- La fase de **maduración** es de una sensibilidad media, siendo esta fase aquella en la que se acumula el aceite. En el caso de cultivos para aceite, cuya recolección se realiza en otoño, normalmente las precipitaciones otoñales aseguran la recuperación hídrica del cultivo. En el caso de un cultivo para aceituna de mesa, en las que el tamaño de fruto es un factor fundamental de la calidad de la aceituna si es necesario el aporte de riego para garantizar un tamaño adecuado de fruto (Moriani *et al.*, 2013).

Habitualmente la restricción del riego se plantea en base a una reducción de la evapotranspiración del cultivo, es decir controlando el agua aplicada. Esto supone una menor exactitud a la hora de definir el nivel de estrés hídrico ya que el suelo puede compensar o no, esta restricción, y los niveles de estrés hídrico alcanzados por los árboles serán diferentes y en distinto momento, dependiendo de las condiciones climatológicas del año. En los últimos años se está comenzando a sugerir diferentes medidas realizadas directamente en planta para poder programar el riego. La idea de este manejo sería regar en función de un determinado nivel de déficit hídrico de manera que ajustemos el agua aplicada para mantenernos en torno a este umbral.

2.5.1. Indicadores del estado hídrico del cultivo.

Tradicionalmente, el indicador más ampliamente utilizado para evaluar el estado hídrico de las plantas ha sido el potencial hídrico foliar (Ψ_h) (Hsiao, 1990). Es una medida muy sencilla y rápida, pero está influenciada por las condiciones climáticas (temperatura, humedad, radiación), por lo tanto es necesario diferenciar el efecto

ambiental, de la falta de agua en el suelo para poder utilizarlo de forma precisa para determinar el riego (Moriana *et al.*, 2012).

A mediados de los noventa comienza a emplearse el potencial hídrico de tallo, como una medida más estable, menos dependiente de las condiciones climáticas empleándose en algunos casos para programar el riego en ciruelo, cerezo y almendro (Shackel *et al.*, 1997; Stewart *et al.*, 2011), y recientemente se han propuesto en olivo umbrales de potencial hídrico de tallo medido al mediodía para mantener un estado hídrico adecuado de -1 a -1,2 MPa (Carr 2013). En estudios realizados sobre el cultivar Manzanilla de Sevilla se han propuesto umbrales de -1,2 MPa en floración y cuajado; y de -1,5 MPa durante la fase de endurecimiento masivo del hueso (Moriana *et al.*, 2012). En riego deficitario también se han propuesto valores de potencial hídrico de tallo medido al mediodía de -1,8 MPa, este umbral durante la fase de endurecimiento masivo del hueso, permite una importante reducción del riego en esta segunda fase sin afectar a la cosecha (Dell`Amico *et al.*, 2012).

Sin embargo, es una medida no automatizable por lo que la programación del riego con este sistema requiere constantes visitas al campo, para determinar el estado hídrico del cultivo y poder programar el riego en base a los umbrales establecidos.

A partir de la década de los 90, comienzan a desarrollarse en trabajos de investigación una gran cantidad de sensores que permiten un control automatizado del sistema suelo-agua-planta (Cohen, 1992). Algunos de estos sistemas se están sugiriendo como herramientas para la programación de riego de frutales, especialmente los sensores de flujo de savia y los de variación del diámetro del tronco (Ortuño *et al.*, 2010).

2.5.2. La variación del diámetro del tronco usada para la mejora del manejo de agua aplicada.

La variación del diámetro del tronco es una media del estado hídrico del cultivo, que puede ser empleada para la programación del riego y permite una monitorización continua (Ortuño 2010; Fernández y Cuevas 2010). El diámetro del tronco varía con ciclos diarios de contracción y expansión que ocurren en todas las plantas incluso en buenas condiciones hídricas (Ortuño *et al.*, 2010). Las oscilaciones están producidas por el desfase entre la absorción radicular y la transpiración de la planta, es decir por procesos de hidratación y deshidratación de los tejidos de la corteza (Brought *et al.*,

1986), y se producen en el siguiente orden: i) Antes del amanecer: El cultivo se rehidrata y el tronco se expande; ii) A primeras horas de la mañana: la transpiración supera a la capacidad de absorción del árbol, comenzando el periodo de deshidratación; iii) Durante la tarde: la absorción es mayor que la transpiración el tronco comienza a rehidratarse empezando de nuevo un ciclo de expansión (Figura 4).

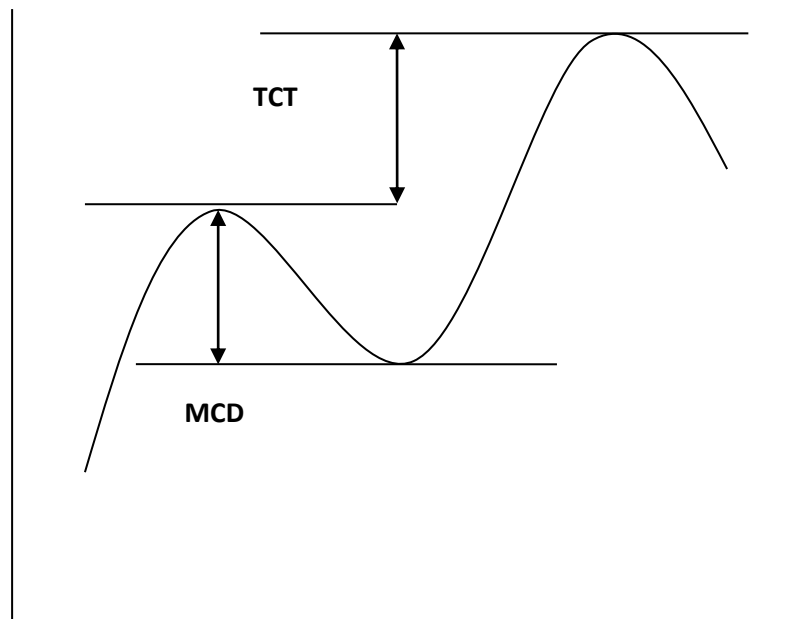


Figura 4. Esquema de dos ciclos diarios de expansión y contracción. Las líneas verticales acotan un día. Las líneas horizontales marcan los puntos característicos de cada ciclo diario, el máximo y el mínimo. Estos puntos son los que se usan para el cálculo de la Máxima Contracción Diaria (MCD) y la Tasa de Crecimiento del Tronco (TCT). (Fuente: Moriana *et al.*, 2012).

Los ciclos de variación del diámetro del tronco no son directamente utilizables si no que se emplean una serie de parámetros calculados a partir de ellos. Los diámetros máximos son los que normalmente se suelen usar y también, la máxima oscilación diaria como indicadores para la programación Goldhamer *et al.*, 1999. Sin embargo, al ser el conjunto de los diámetros máximos un valor acumulado es muy difícil de interpretar en un periodo largo de tiempo. Moriana y Fereres (2002) sugirieron el uso de la diferencia entre los diámetros máximos, la tasa de crecimiento del tronco (TCT).

El otro indicador más comúnmente empleado es la máxima contracción diaria (MCD), que se incrementa muy rápidamente en condiciones de estrés hídrico en comparación con los árboles en ausencia de estrés (Goldhamer *et al.*, 1999). Sin embargo, si solamente vemos datos aislados de árboles de los que desconocemos su estado hídrico es común que la MCD oscile de un día para otro lo que indica la necesidad de una referencia. Esta variación en los valores de la MCD diaria está provocada principalmente por las variaciones en la demanda evaporativa. Para separar este efecto del estrés hídrico, Godhamer y Fereres (2001) sugirieron el uso de valores relativos. Estos autores sugieren el uso de “árboles de referencia”, árboles que se riegan por encima de sus necesidades, en los que se compara sus valores con los obtenidos en los árboles que se quiere controlar el riego. El valor relativo empleado es denominado “Intensidad de la señal” o “señal” que es el cociente entre la MCD de las plantas que se quieren programar y la MCD de los árboles de referencia. Esta técnica se ha empleado en riego deficitario controlado en almendro (Godhamer y Fereres, 2004) y limón, (Ortuño *et al.*, 2009) con resultados muy satisfactorios. No obstante, no es una solución comercial ya que no es factible el tener una zona de “árboles de referencia”, y aunque lo fuese, a medio plazo estos árboles no serían comparables con los que están regados deficitariamente.

En resumen los parámetros calculados a partir de la variación del tronco diaria que pueden emplearse para aplicar riego deficitario controlado son:

- **Diámetro máximo diario:** es el valor máximo obtenido a primeras horas de la mañana, justo antes del comienzo de la deshidratación.
- **Diámetro mínimo diario:** es el valor mínimo obtenido durante la tarde.
- **Máxima contracción diaria (MCD):** es la diferencia entre los dos anteriores.
- **Tasa de crecimiento del tronco (TCT):** es la diferencia entre dos máximos diarios, expresa el crecimiento diario.
- **Intensidad de la Señal (Señal):** es el cociente entre la MCD de las plantas que se quieren programar y la MCD de referencia.

2.5.6. El uso de las líneas base como herramienta del manejo de agua aplicada.

La aplicabilidad a nivel comercial RDC mediante la variación del diámetro del tronco requiere una alternativa a los árboles de referencia. Es por ello que algunos autores proponen el cálculo de línea base que relacionen algún parámetro meteorológico (temperatura máxima, ETo, DPV) con la MCD. Las líneas base son ecuaciones que estiman la MCD en condiciones de ausencia de estrés hídrico relacionando este parámetro con alguna variable meteorológica sencilla. Hay descritas varias líneas base para diferentes especies de frutales como el almendro (Goldhamer y Fereres, 2003), ciruelo (Intrigliolo y Castel, 2004; Intrigliolo y Castel, 2006), limonero (Ortuño *et al.*, 2006) y melocotonero (Conejero *et al.*, 2007). En olivo están descritas para cultivar Manzanilla, en árboles de 37 años en función de la temperatura media diaria (Moreno *et al.*, 2006) y para árboles de 41 años, diferenciadas las ecuaciones de referencia para años de carga y descarga en función de la temperatura máxima diaria (Mariana *et al.*, 2011).

Estas líneas de base de referencias pueden adaptarse a nuevas condiciones, cultivos con diferentes características (edad, árboles, densidad, suelo) mediante una extrapolación de la línea base de referencia obtenida en estudios anteriores con 5 años de cultivo, para el mismo cultivar y zona de cultivo. Esta propuesta emplea los datos de MDS y temperatura máxima en la Fase I del cultivo para ajustar la línea base de referencia al cultivo objeto de riego, y permite la generalización de esta metodología al mejorar el ajuste de la línea base de referencia a fincas comerciales (Corell *et al.*, 2013).

La aplicación de la metodología es sencilla, solo precisaríamos conocer el parámetro meteorológico en cuestión, por ejemplo la temperatura máxima, para obtener una aproximación a los valores de MCD de referencia, y a partir de aquí, poder decidir la programación del riego con la señal de MCD. Para este parámetro y en el caso del olivo, los valores inferiores a 1 son los que se consideran condiciones de estrés.

El olivo es una especie en la que el uso de la variación del diámetro del tronco ha sido poco satisfactorio hasta la fecha. En esta especie la MCD es muy poco sensible a

condiciones de estrés hídrico moderado, dando valores prácticamente idénticos de este parámetro entre tratamientos claramente diferentes desde el punto de vista hídrico (Moriana y Fereres, 2002; Moriana *et al.*, 2003; Moriana *et al.*, 2010). Solamente cuando el estrés hídrico es severo (potenciales hídricos menores de -2 MPa) hay una disminución de la MCD respecto de árboles control y se establecen de forma clara diferencias. La relación entre MCD y el potencial hídrico foliar es similar a una parábola en la que habría una zona de valores máximos de incertidumbre. Ya que la disminución inicial del potencial hídrico supondría un aumento de la MCD, y a partir de valores de -1,2MPa la disminución del potencial hídrico daría lugar a una disminución de la MCD (Moriana *et al.*, 2000) (Fig. 5).

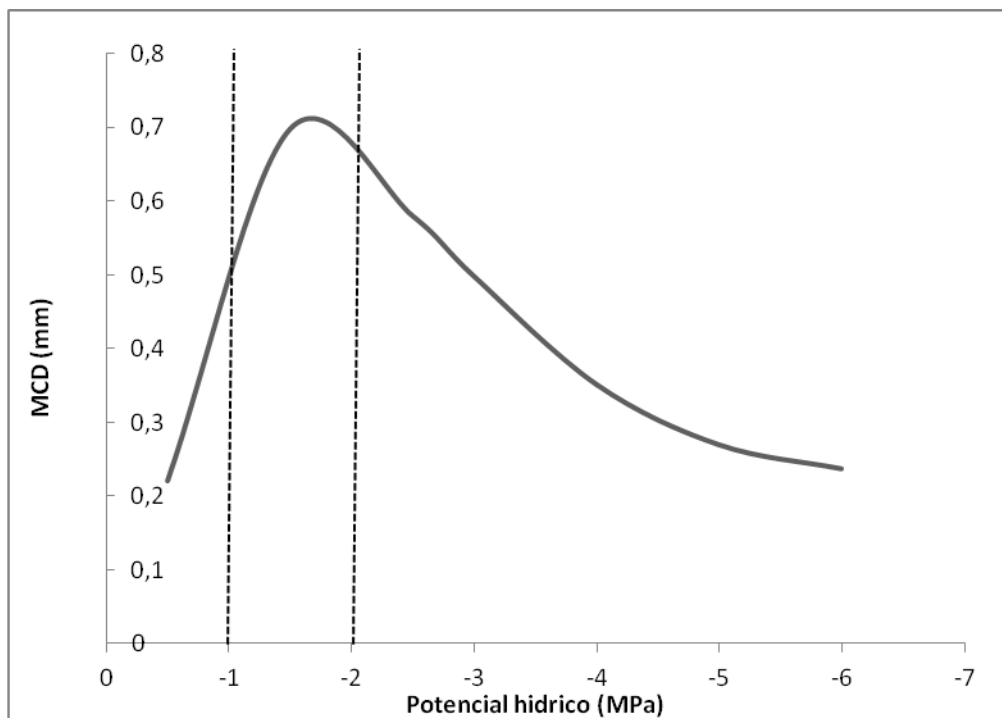


Figura 5. Relación entre Potencial hídrico foliar y máxima contracción diaria. Las líneas verticales indican la zona de incertidumbre en la que diferencias en el potencial hídrico foliar no muestran diferencias en la MCD (Moriana *et al.*, 2000).

Por otro lado, la tasa de crecimiento del tronco (TCT) sí que parece ser un indicador precoz de condiciones de estrés hídrico en este cultivo, incluso más precoz (al menos en árboles jóvenes) que el potencial hídrico (Moriana y Fereres, 2002). La TCT está muy influenciada por la presencia del fruto y no parece estar relacionada, al menos de

forma sencilla, con ningún parámetro meteorológico, lo que dificulta el uso de umbrales.

Esto supone una clara diferenciación del parámetro a emplear en el caso del olivar, dependiendo del estado fenológico del cultivo y del nivel de estrés hídrico que vayamos a emplear. Según el riego deficitario tradicional en olivar (Goldhamer, 1999) los mayores niveles de estrés hídrico podrían realizarse en la fase de endurecimiento masivo del hueso, mientras que para el resto los niveles de estrés hídrico sería necesario un indicador más preciso. Por lo tanto la MCD podría ser empleada durante esta fase asumiendo que sólo sería un indicador válido si conseguimos niveles de estrés hídrico inferiores a -2 MPa. Recientemente, Moriana *et al.*, 2011, han sugerido una línea base en olivar en función de la temperatura máxima lo que permitiría establecer niveles de estrés en función de la MCD. Con este planteamiento la TCT debería ser un indicador adecuado en la Fase I de floración cuajado y la Fase III de acumulación de aceite. Mientras que la MCD podría ser empleada durante la fase de endurecimiento masivo del hueso (Fase II).

3. OBJETIVOS.

El objetivo esencial de este trabajo es el de comprobar si es posible el manejo de la programación de riego en el olivar de mesa con el empleo exclusivo de la variación del diámetro del tronco, imponiendo condiciones de estrés hídrico en la fase de endurecimiento del hueso considerando líneas base.

1. Programar el riego deficitario en una finca de “Manzanilla de Sevilla” tradicional con las líneas de referencia de la medida de la variación del diámetro del tronco y la temperatura máxima diaria.
2. Validar la adaptación de las líneas base de referencia, obtenidas en trabajos previos, a condiciones diferentes de densidad de plantación.
3. Estudiar la respuesta fisiológica y productiva del cultivo al riego deficitario programado con las líneas base de referencia.

4. MATERIAL Y MÉTODOS.

4.1. Descripción de la finca.

4.1.1. Situación.

La finca “La Hampa” se encuentra en Coria de Río, pueblo que se sitúa al pie de la cornisa del Aljarafe y muy próximo a las marismas del Guadalquivir, sus coordenadas geográficas son: 37º 17' N, 6º 3' O con una altitud de 30 metros sobre el nivel del mar. Pertenece al instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (CSIC). En la finca se cultivan trigo y girasol como herbáceos de secano; algodón, remolacha y maíz como herbáceos de regadío; olivo y cítricos como arbóreos.

4.1.2 Clima.

Se describe el clima de la zona como templado, Mediterráneo, de inviernos suaves y húmedos y veranos calurosos y secos (Mudarra 1988).

Según la **Soil Taxonomy**, el régimen de humedad del suelo es Xérico y el régimen de temperatura es Térmico.

Los datos climáticos medios son (Mudarra, 1988):

Temperatura media anual:	17,5°C
Temperatura media mes más frío:	5,2°C (Enero)
Temperatura media mes más cálido:	33,5°C (Julio)
Oscilación termométrica:	28,3°C
Evapotranspiración:	1445 mm

Los datos de pluviometría de la zona indican que la época húmeda se extiende a lo largo de los meses comprendidos entre finales de septiembre y principios de mayo, siendo el periodo más seco desde junio a principios de septiembre y las precipitaciones nulas en los meses de julio y agosto.

4.1.3. Suelo.

El suelo de la parcela en la que se han realizado los estudios, tiene una pendiente variable entre el 3% y el 6%. Cuenta con una profundidad útil variable entre 0,9 y 2 m. Por debajo de esta capa se dificulta la penetración del agua y de las raíces.

La textura del suelo es franco-arenosa, más o menos uniforme en todo el perfil con unos valores medios de 14,8% de arcilla, 7% de limo, 73,5% de arena gruesa y un 4,7% de arena fina. Análisis efectuados en laboratorio indican valores del contenido volumétrico de agua en suelo de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para un potencial mátrico de 0 MPa y a -1,5 MPa, es de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

La densidad aparente media es variable entre 1,4 y de 1.7 Mg m^{-3} . Otra de las características de nuestro suelo es la cantidad de materia orgánica del suelo, baja con respecto al contenido en fósforo y en potasio cuyos niveles son normales (10 ppm Olsen y 185 ppm respectivamente).

4.1.4. Medidas meteorológicas.

La finca "La Hampa" cuenta con una estación meteorológica Campbell, a aproximadamente 50 metros del olivar donde se realizan los estudios. La estación hace un registro de los parámetros cada 30 minutos; valores máximos, mínimos y medios de las siguientes variables: temperatura ($T, ^\circ\text{C}$), humedad relativa (HR,%), radiación fotosintética activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), radiación difusa (PAR_{dif}, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), radiación solar global R_{sg} , (W m^{-2}), radiación neta (R_n , W m^{-2}), velocidad (u , m s^{-1}), dirección del viento (d , grados) y precipitación (P , mm); parámetros que nos sirven para calcular la ETo. Los datos de precipitación son tomados cada 10 minutos. Además de las medidas mencionadas la estación calcula: presión de vapor a saturación (P_{sat} , kPa), déficit de presión de vapor (DPV, kPa), temperatura de punto de rocío (T_d , $^\circ\text{C}$) y radiación acumulada total (R_{acum} $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

4.2. Descripción de la parcela y diseño experimental.

Los árboles estudiados son olivos de 43 años de edad de la variedad “Manzanilla de Sevilla”, que están formados en vaso, a un solo pie y con dos ramas principales. El marco de plantación utilizado es de 7 m x 7 m. La parcela está formada por 90 árboles. La poda que se le ha efectuado a los árboles está caracterizada por un aclareo intenso de ramas finas con tijeras y calabozo.

El manejo de la plantación de no laboreo con aplicación de herbicidas que se realiza en la finca coincide con los habituales en plantaciones comerciales de olivo de la zona.

El agua de riego utilizado en la finca se obtiene de un pozo localizado dentro de la misma, y se caracteriza por una conductividad eléctrica (CE) de $2,45 \text{ dS m}^{-1}$, un contenido de sales de $1,6 \text{ g L}^{-1}$ y un contenido medio de cloruro de 468 g m^{-3} .

El agua se bombea desde el pozo mencionado anteriormente a 8 depósitos de 2000 litros cada uno, que se sitúan junto al cabezal de riego (dentro de la caseta de riego).

El cabezal cuenta con los siguientes elementos:

- Equipo de bombeo (bomba de 1,5 CV de potencia).
- Equipo de fertirrigación con depósito de 1500 litros de capacidad, bomba agitadora y bomba inyectora.
- Depósito de 4000 litros (almacenamiento de fertilizante líquido).
- Equipo de filtrado compuesto por filtro de anillas, manómetro antes y después del filtro, sistema de tuberías y válvulas de accionamiento (limpiado por inversión de flujo).
- Regulador de presión, ajustado a 3 kg cm^{-2} .
- Programador de riego (Progres S.A., MOD. Agronic 4000) que permite controlar de forma automática los sectores de riego.

Además, del cabezal de riego salen diez tuberías que riegan los 10 sectores de la parcela objeto de estudio. Al principio de cada tubería se localiza un contador y la electroválvula, dirigida por el programador de riego.

El diseño experimental fue de bloques al azar, con cinco parcelas-repetición por tratamiento. Cada parcela- repetición estuvo compuesta por 9 árboles.

4.2.1 Tratamientos de riego.

Para alcanzar los objetivos planteados se aplicaron dos tratamientos de riego. El tratamiento de Riego deficitario Controlado (RDC) se realizó con el empleo de la variación del diámetro del tronco diario. Mediante el uso de las líneas base desarrolladas anteriormente por Moriana *et al.*, 2011, en ensayos con la variedad “Manzanilla de Sevilla”. Se trata de estudiar la viabilidad de dichas líneas base para establecer los tratamientos de riego deficitario controlado en una finca con diferentes características (edad, densidad y ubicación).

La variación del diámetro del tronco muestra un ciclo diario que se inicia al comienzo del día cuando la transpiración comienza a ser significativa y la absorción radicular no es capaz de compensarla, el tronco se deshidrata cediendo agua al xilema lo que supone que se inicie el periodo de contracción. Cuando la transpiración se reduce y la absorción permite la rehidratación de la planta el tronco comienza la fase de expansión (Moriana *et al.*, 2002) (ver Fig. 5).

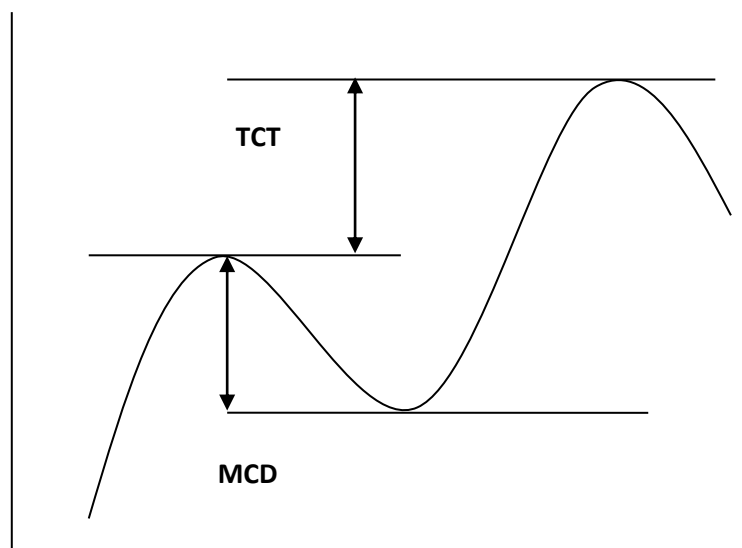


Figura 6. Esquema de dos ciclos diarios de expansión y contracción. Las líneas verticales acotan un día. Las líneas horizontales marcan los puntos característicos de cada ciclo diario, el máximo y el mínimo. Estos puntos son los que se usan para el cálculo de la Máxima Contracción Diaria (MCD) y la Tasa de Crecimiento del Tronco (TCT). (Fuente: Moriana *et al.* 2012).

Estos ciclos están caracterizados por dos puntos, el máximo diario (primera hora de la mañana) y el mínimo diario (última hora de la tarde).

A partir de este máximo y mínimo podemos obtener la máxima oscilación diaria (MCD) que representa la diferencia entre el máximo y el mínimo diario. Y con la evolución diaria de la máxima contracción del tronco calculamos la tasa de crecimiento diario del tronco (TCT). De modo que los parámetros calculados en base a la variación diaria del tronco para la programación del riego fueron:

- **Tasa de crecimiento del tronco (TCT):** es la diferencia entre los dos diámetros máximos de dos días consecutivos (Fig. 5).
- **Máxima contracción diaria (MCD):** es la diferencia entre el máximo y el mínimo diario (Fig. 5).
- **Señal MCD:** es el cociente entre la MCD medida y la MCD de referencia.

Los tratamientos de riego aplicados fueron:

Tratamiento RDC. Tratamiento de riego deficitario controlado, en función del estado fenológico de los árboles se establecieron tres fases:

FASE I: Desde el inicio de los riegos hasta el comienzo de la fase de endurecimiento masivo del hueso, esta fase comenzó el DDA 87 (27 de marzo de 2012) y se mantuvo hasta el DDA 180 (27 de junio de 2012).

La consigna de riego fue mantener la tasa de crecimiento del tronco por encima de 20 $\mu\text{m día}^{-1}$ para evitar condiciones de estrés a los árboles, este valor se estableció en base a la experiencia previa.

FASE II: Desde el comienzo de la fase de endurecimiento masivo del hueso hasta la rehidratación, en nuestro caso del DDA 180 (28 de junio de 2012) al DDA 232 (19 de agosto de 2012). Esta fase es en la que el olivo es más resistente al estrés hídrico.

La consigna de riego fue la señal de MCD, cuando alcanzó valores inferiores a 0.75 se aplicó riego, es decir cuando la MCD era un 75% de la MCD esperada.

Empleamos la línea base de referencia en función de la temperatura máxima diaria propuesta por Moriana *et al.*, (2012): $\text{MDS } (\mu\text{m}) = 640 + 36T^{\text{a}} \text{ máx } (^{\circ}\text{C})$. Pero la

adaptamos siguiendo la metodología propuesta por Corell *et al.*, 2013. Para ello tomamos los datos de MDC y T^a máxima diaria desde el DDA 83 (23 de marzo de 2012) al 172 (20 de junio de 2012) para establecer la nueva ordenada en el origen. Mantenemos la pendiente de la línea base de referencia y así obtenemos la nueva línea base adaptada a las condiciones de nuestra parcela: $MDS (\mu m) = -734 + 36T^a \text{ máx} (\text{°C})$ (ver fig. 6).

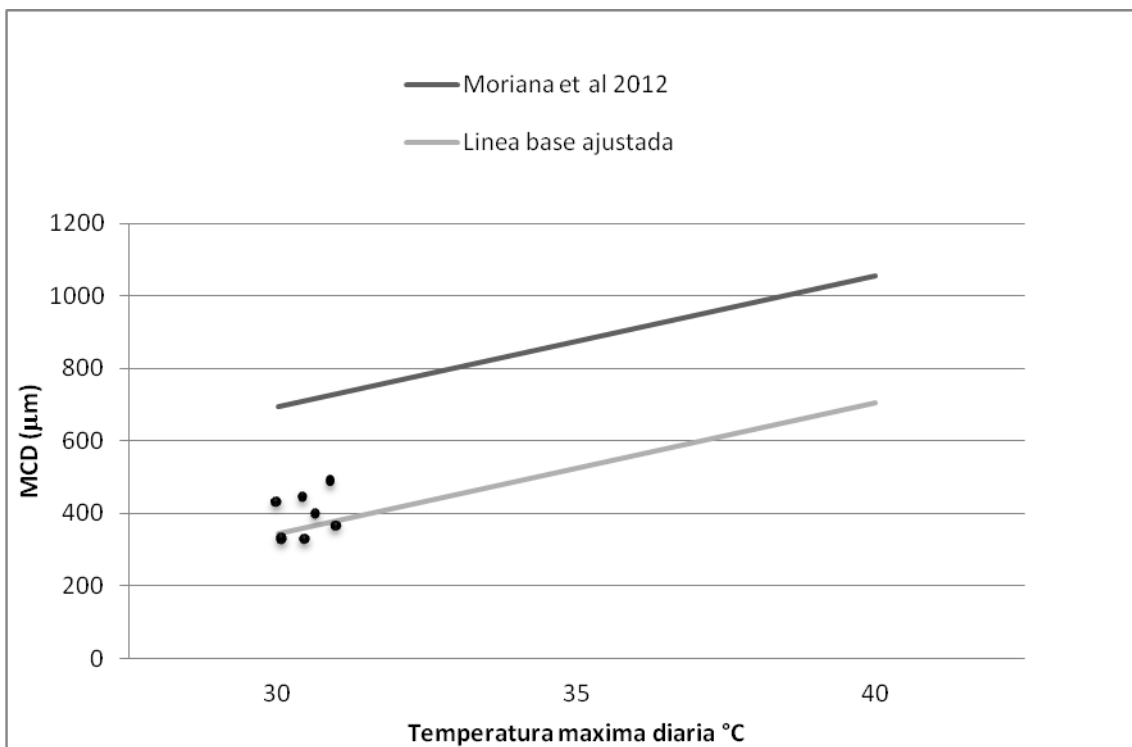


Figura 7. Línea base de referencia propuesta por Moriana *et al.*, 2012 para Manzanilla de Sevilla y ajuste de la línea base de referencia propuesta por Corell *et al.*, 2013.

FASE III: Desde la rehidratación hasta el momento de la cosecha, del DDA 232 (19 de agosto de 2012) hasta el DDA 262 (18 de septiembre de 2012). Esta fase recibe el nombre de rehidratación de los árboles ya que con el riego aplicado durante la misma se pretendió recuperar a los árboles, del estrés recibido, y especialmente rehidratar la producción.

Estudios realizados anteriormente nos permitieron fijar un valor de tasa de crecimiento del tronco igual a $-5 \mu m \text{ día}^{-1}$, ya que no supone estrés al árbol y permite la rehidratación de los árboles y la cosecha.

La cantidad de agua a aplicar se decidió en función a la distancia de la medida (TCT o señal) con el valor umbral determinado como consigna de riego para cada fase:

- Si la desviación respecto al umbral era menos del 15% el riego aplicado era de 1 mm en ese momento.
- Si la desviación respecto al umbral se situaba comprendida entre el 15% y el 30% el riego aplicado era de 2 mm.
- Si la desviación respecto al umbral era mayor del 30% el riego aplicado era de 4 mm.

Tratamiento control. Tratamiento basado en el riego de árboles al 100% de la ETc, con la intención de cubrir las necesidades del árbol, con una aplicación de agua diaria sin tener en cuenta el agua del suelo. El cálculo de la ETo se realizó siguiendo la fórmula de Penman-Montheith con los datos registrados en la estación meteorológica. Se aplicaron los coeficientes de cultivo adaptados a la zona por Fernández *et al.*, 2006 y un coeficiente reductor calculado en función del sombreado del suelo según Orgaz y Fereres (2008) de 0.8.

Tabla 2. Coeficientes de cultivo en olivo adaptados a la zona por Fernández et al (2006) empleados para el riego Control durante el verano del año 2012.

Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Kc	0.88	0.84	0.76	0.7	0.63	0.63	0.72	0.77

El agua aplicada en ambos tratamientos de riego se recoge en la Tabla 3. La mayor cantidad de agua fue aplicada en la Fase I siendo siempre menor en el tratamiento RDC que en el control. En la segunda fase (desde endurecimiento masivo del hueso) no fue prácticamente necesario el aporte de agua de riego en el tratamiento RDC.

Tabla 3. Cantidad de agua aportada a los dos tratamientos diferentes incluyendo también la ETc del cultivo en las tres fases del estudio realizado en Coria del Río en 2012.

FASE	Control (mm)	RDC (mm)	ETc media diaria (mm)
I	84.5	47.01	2.88
II	150.37	1.81	3.19
III	69.76	21.37	2.76
TOTAL	304.63	70.20	

En la Figura 8 podemos observar la cantidad de agua aplicada en los dos tratamientos de riego, evidenciando que la cantidad acumulada en el tratamiento RDC fue bastante inferior al tratamiento Control. La curva que representa el tratamiento RDC es creciente al igual que la del tratamiento Control con la diferencia de que las subidas en el tratamiento Control son más pronunciadas.

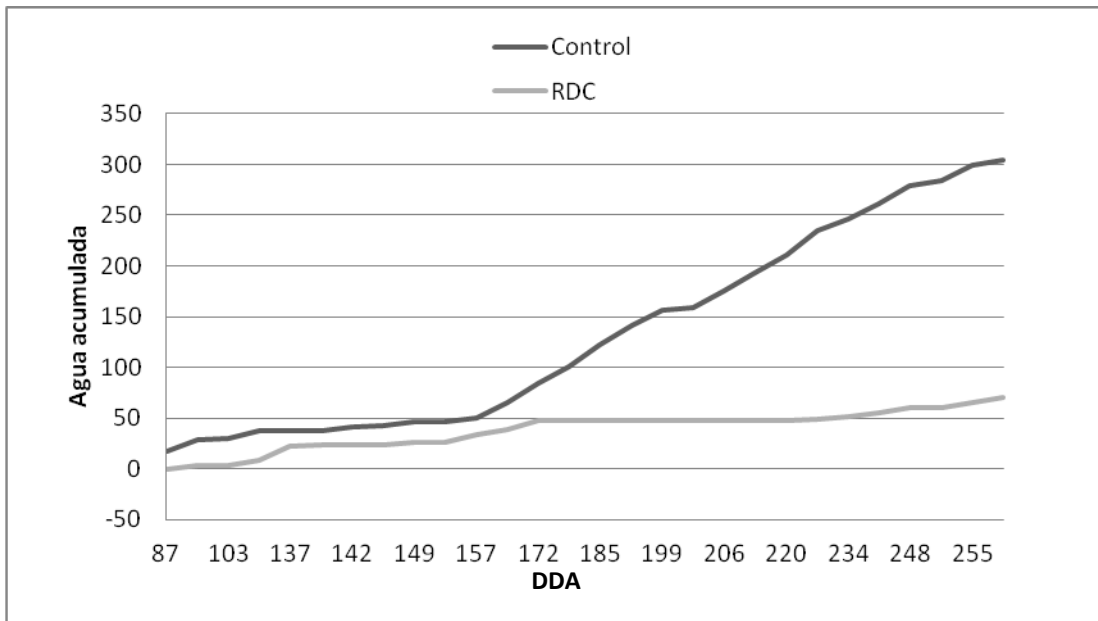


Figura 8. Agua aplicada en cada uno de los dos tratamientos de riego durante las tres fases de estudio.

El experimento comenzó con el inicio de los tratamientos de riego el DDA 87 (27 de marzo de 2012) y finalizó el DDA 262 (18 de septiembre de 2012).

La aplicación de riego se llevó a cabo mediante líneas de portagoteros por cada fila de árboles, con cinco goteros por árbol con una separación de 1 metro entre sí (un gotero se encuentra junto al tronco), los goteros empleados fueron antidrenantes y autocompensantes, con un caudal de 8 L h^{-1} .

4.3. Parámetros estudiados.

4.3.1. Crecimiento de ramos, número de inflorescencias y frutos.

Para cada uno de los tratamientos de riego planteados se seleccionaron 5 árboles, uno en cada parcela-repetición. En ellos se eligieron 10 ramos al azar con orientación sur-este, a una altura adecuada para las personas que realizaron las medidas. Se marcaron de manera que pudieran identificarse perfectamente (Ver Fig. 9).

Los parámetros medidos fueron:

- **Crecimiento de ramos** (l, cm): se midieron de forma periódica a lo largo de todo el estudio, semanalmente. Realizándose la medida desde el inicio del crecimiento (momento en el que se estableció la marca de referencia) hasta el ápice del ramo.
- **Número de inflorescencias**: utilizamos los mismo ramos en los que medimos el crecimiento, realizando un conteo de inflorescencias mensualmente, desde la el comienzo de la floración hasta finales de Junio en los que las inflorescencias fueron fecundadas.
- **Número de frutos**: se contabilizaron los frutos por ramos, sobre los mismos ramos marcados para el crecimiento.
- **Diámetro longitudinal del fruto**: se determinó el diámetro longitudinal de 10 frutos por árbol elegidos al azar (Fig. 8). Para establecer el momento de inicio de estado fenológico de endurecimiento masivo del hueso, que según Rapoport *et al.* (2013) ocurre con el cambio de pendiente del crecimiento en longitud del fruto.
- **Diámetro transversal del fruto**: se determinó el diámetro transversal de 10 frutos por árbol elegidos al azar.
- **Volumen del fruto**: se calculó a partir de los diámetros longitudinales y transversales de 10 frutos por árbol elegidos al azar.



Figura 9. Izquierda: marcadores de ramos. Derecha: Medida diámetro longitudinal del fruto.

4.3.2. Potencial hídrico.

Para la determinación del potencial hídrico (Ψ , MPa) se utilizó una cámara de presión (Fig. 9) (Model 600 Pressure Chamber, PMS Instrument Company, Albany USA) con la técnica de Scholander (1965) y teniendo en cuenta las recomendaciones de Turner (1981).



Figura 10. Cámara de presión.

Las medidas de potencial se realizaron al mediodía, sobre hojas basales situadas en la parte interior del árbol para evitar la radiación. Se cubrieron con papel de aluminio para evitar la transpiración 2 horas antes de la medida del potencial (Fig. 11).

Para realizar la medida solo se utilizó 1 hoja se envolvieron dos hojas por árbol, para contar con una de reserva en caso de necesitarla.



Figura 11. Izquierda: Hoja envuelta en papel de aluminio Derecha: Medida del potencial hídrico.

Una vez cortada la hoja seleccionada, se introdujo en la cámara herméticamente cerrada a la que se fue incrementando la presión progresivamente. Una vez que la presión dentro de la cámara fue similar a la que tenía la hoja en el árbol se observó una salida continua de agua en el corte realizado en el pedúnculo de la hoja, tomando el valor que se registró en ese instante.

4.3.3. Conductancia estomática.

Las medidas de conductancia estomática se han realizado con un porómetro de régimen permanente LiCor 1600 (Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA).

La conductancia foliar del olivo es un parámetro que alcanza valores máximos a primera hora de la mañana y unos valores mínimos al mediodía (Moriana *et al.*, 2002). En el presente estudio realizado hemos considerado que los valores máximos se alcanzaban aproximadamente a las 10:00 de la mañana, realizando dos medidas por árbol (Fig. 12).

Para realizar las medidas de conductancia estomática, se debe fijar un valor de la humedad constante dentro de la cubeta, que debe coincidir con la humedad relativa del aire, después debe introducirse la hoja, siempre con el envés orientado al interior de la cubeta, intentando que el termopar quede en contacto con la hoja que se mantenga constante a la radiación incidente. Esta hace que en el interior de la cubeta aumente la humedad relativa y el porómetro incremente la cantidad de aire seco en la cubeta, por lo que para poder determinar la conductancia estomática es necesario

conocer la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura de la hoja y la tasa de flujo de aire seco.

Todos estos pasos se siguieron durante la medición in situ realizada en nuestro estudio.



Figura 12. Medida de conductancia estomática.

4.3.4. Variaciones del diámetro del tronco mediante dendrómetros.

La medida de las oscilaciones del tronco se llevo a cabo con sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal, que detectan cambios micrométricos en el diámetro del tronco; medidas registradas de forma automática y continua. Los sensores utilizados en nuestro caso fueron: captador de desplazamiento miniatura de CC/cc, (LVDT, Solarton Metrology, Bognor Regis, UK, modelo DF +- 2.5 μm), calibrados y termoestables (ver Fig. 13).

La estructura y composición de estos sensores fue la siguiente:

- Núcleo magnético situado en una varilla que se apoyó en el tronco.
- Cilindro dentro del cual se situó la varilla anteriormente citada, entre un embobinado primario y otro secundario (la varilla se desplazó con las oscilaciones del tronco).

- Bobina primaria alimentada con corriente continua de 12 V, que produjo un campo magnético cuya variación induce un voltaje en la bobina secundaria.
- Bobina secundaria cuya señal inducida está relacionada con el número de espiras expuestas.
- Portasensor construido con aleación de níquel y de hierro, con un coeficiente de dilatación próximo a 0 y aluminio (Requena Co., España, model R- 150mm).
- Sustancias adherentes para que el contacto entre el extremo de la aguja y el órgano sea perfecto.

La señal que produjo este sensor se almacenó en un sistema recolector de datos (*data logger*) (CR1000, Campbell Sci, Reino Unido) localizado en el centro de la parcela y que realizó medidas cada 30 segundos con medias cada 15 minutos.



Figura 13. Bobina del dendrómetro y aguja, detalle de la colocación en el árbol del sensor.

4.4. Cosecha y calidad.

La cosecha se llevó a cabo en la semana del 17 al 23 de septiembre y se realizó manualmente, pesándose individualmente la producción de cada árbol, en las cinco parcelas de cada tratamiento de riego estudiado. Se tomó una muestra de 1 Kg de frutos por árbol, sobre el que se estudiaron distintos parámetros de calidad:

Escandallo: se contabilizó el número de frutos por kilogramo en cada muestra.

Índice de Madurez (IM), se clasificaron 100 frutos de cada muestra según las clases propuestas por Hermoso et al. (1995)(Ver Fig. 14), contabilizaron y se calculó el índice de madurez, mediante la siguiente fórmula:

$$IM = \frac{(Ax0 + Bx1 + Cx2 + Dx3 + Ex4 + Fx5 + Gx6 + Hx7)}{100}$$

dónde: 'A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'H' es el número de frutos de las clases 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Descripción de las clases de aceitunas en función de su estado de madurez (Hermoso *et al.*, 1995).

0 Piel verde intensa

1 Piel verde amarillenta

Piel verde con manchas rojizas en menos de la mitad del fruto. Inicio de
2 envero

3 Piel rojiza o morada en más de la mitad del fruto. Final del envero

4 Piel negra y pulpa blanca

5 Piel negra y pulpa morada sin llegar a la mitad de la pulpa

6 Piel negra y pulpa morada sin llegar al hueso

7 Piel negra y pulpa morada totalmente hasta el hueso



Figura 14. Las cinco primeras fases del desarrollo del color de la piel en la aceituna: Índice de madurez.

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

5.1. Análisis climatológico.

Las condiciones climáticas ocurridas en Coria del Río durante el periodo de estudio (verano 2012) y el año climático 2012 fueron las habituales en la zona (Junta de Andalucía 2000-2011).

Las temperaturas medias que se registraron fueron muy similares a las de años anteriores (Junta de Andalucía 2000-2011) con una temperatura mínima media de aproximadamente 16°C y una temperatura máxima media de 33°C en el periodo comprendido entre Mayo y Agosto (Fig. 15).

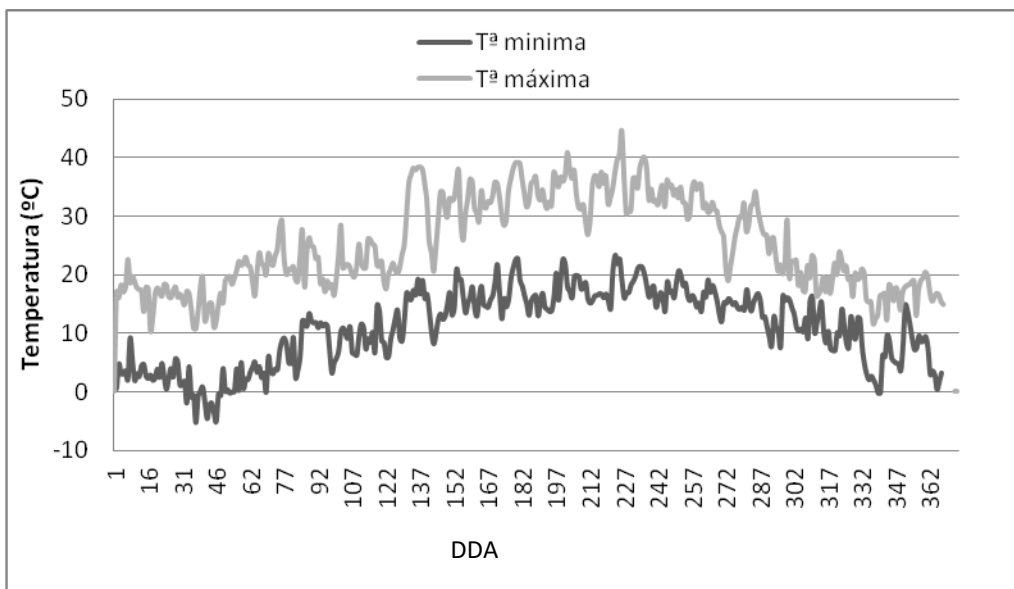


Figura 15. Temperaturas máximas y mínimas (°C) registradas en Coria del Río en el año 2012.

Podemos observar en la Figura 15 las temperaturas registradas durante todo el año en Coria del Río. La temperatura mínima se observó el DDA 36 (5 de febrero), y la temperatura máxima se alcanzó el DDA 224 (11 de agosto), como podemos apreciar las temperaturas máximas comenzaron a incrementarse a partir del DDA 131 (10 de Mayo) y se mantuvieron por encima de 30°C hasta el DDA 279 (5 de octubre). Las temperaturas mínimas superaron los 10°C durante este periodo y no descendieron hasta el DDA 290 (15 de octubre). Este comportamiento es habitual en la zona,

característica por un periodo amplio de déficit hídrico, con elevadas temperaturas y bajos contenidos de humedad relativa en el aire (AEMET).

Con respecto a la humedad relativa (Fig. 17) los datos más altos de humedad que se registraron coinciden con los periodos de temperaturas más bajas, y en los meses más calurosos se registraron los mínimos de humedad; desde el DDA 131 (10 de mayo) hasta el DDA 258 (14 de septiembre) la humedad relativa mínima fue menor del 20% durante el 32% de los días, registrándose el valor más bajo el DDA 197 (15 de julio).

En el periodo estival, periodo de mayor déficit hídrico en la zona, la humedad relativa suele ser más baja (mayo, junio, julio y agosto), durante el estudio se registró una humedad relativa media de 54%, inferior a datos medios de años anteriores (65%) (Junta de Andalucía 2000-2010).

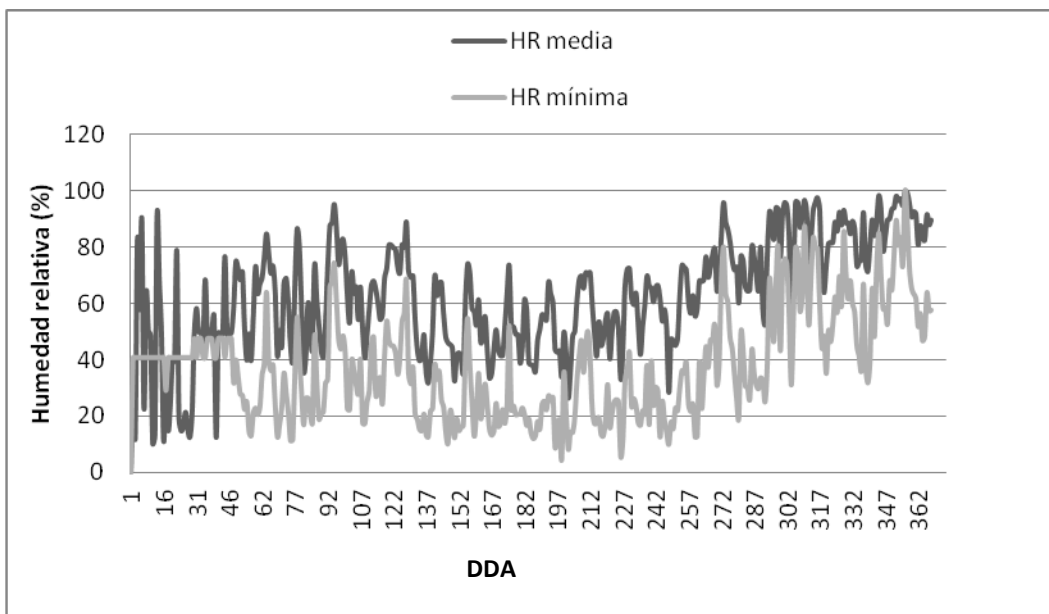


Figura 16. Humedad relativa media y humedad relativa mínima (%) registradas en Coria del Río en el año 2012.

La ETo (Fig. 17) que se obtuvo en el periodo de estudio alcanzó valores medios entre 1,13 y 8 mm d⁻¹; siendo menores en la época de mayores precipitaciones y aumentando en el periodo estival (junio, julio y agosto), alcanzando el valor máximo el DDA 200 (18 julio). A partir del DDA 131 (10 de mayo) coincidiendo con el ascenso de las temperaturas y la reducción de la humedad relativa del aire, se observó un

aumento generalizado de los valores de ETo, superando los 5 mm diarios (62% de los días) y los 6 mm (32,5% de los días) hasta el DDA (29 de agosto).

Las precipitaciones registradas en Coria del Río en el año 2012 (302,95mm) fueron menores a la media de los 10 años anteriores siendo está 568,1 mm. En general es una zona caracterizada con un invierno suave de pocas precipitaciones (Junta de Andalucía 2001-2012).

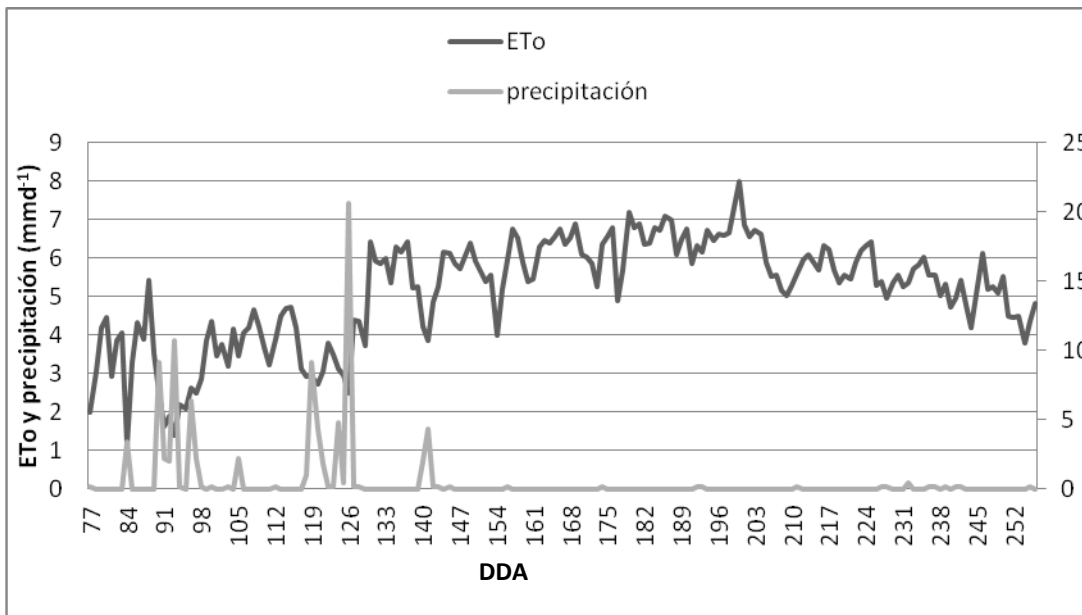


Figura 17. ETo y precipitación registrados en Coria del Río en el año 2012.

Podemos observar que el valor máximo de ETo se registró el DDA 200 (18 de julio) y el valor mínimo el DDA 84 (24 de marzo), correspondiendo el mínimo con la época de mayores precipitaciones (primavera) y la mayor precipitación registrada ocurrió el DDA 126 (5 de mayo). A partir del DDA 149 (28 de mayo) en adelante, prácticamente desaparecen las precipitaciones, como suele ser habitual en la zona.

En la Figura 19 se representa la ETc del cultivo y el déficit de presión de vapor, donde se observa que las necesidades máximas del cultivo correspondieron a los meses más calurosos del periodo de estudio, siendo ese momento el de mayores necesidades hídricas.

El otro parámetro representado en la figura es el déficit de presión de vapor que como podemos ver es una curva más estable con valores normalmente comprendidos

entre 1-2 KPa, aunque hay algún valor por debajo de 1 y algunos valores por encima de 2, siendo estos un número muy reducido, viéndose en este parámetro una gran oscilación entre días. Se observó una subida importante del DPV desde mediados del mes de Mayo (DDA 130), con oscilaciones, pero con valores medios elevados (en torno a 2 KPa) hasta finales de julio (DDA 205-210).

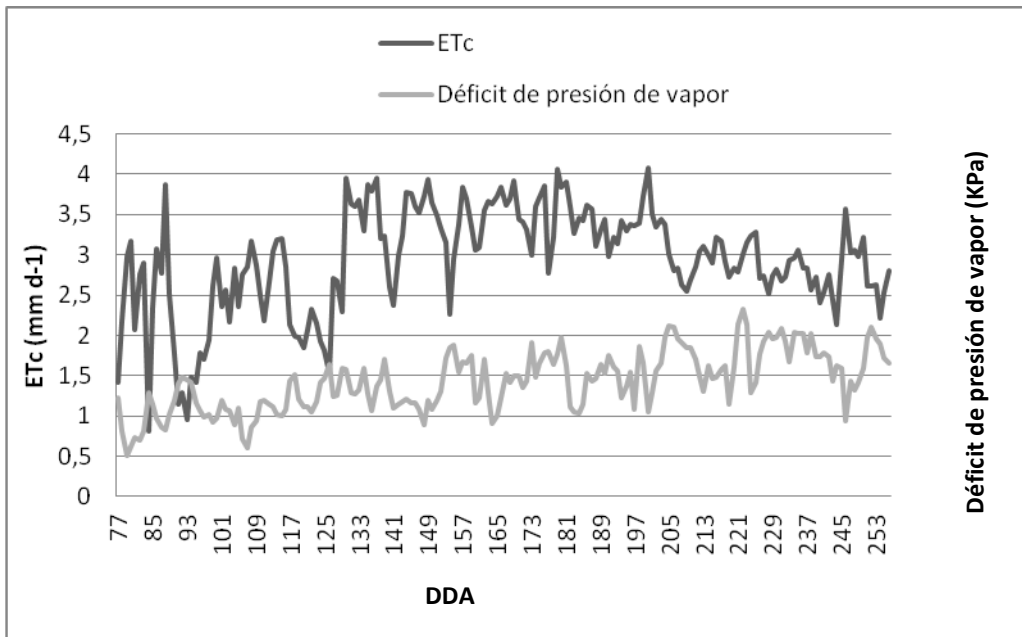


Figura 18. ETC calculada (ET_o y K_c registradas en el periodo de estudio) y déficit de presión de vapor registrada en Coria del Río en el año 2012.

En la figura 19 se ha representado la media de humedad del suelo del perfil del suelo en los dos tratamientos de riego aplicados. El tratamiento Control se situó en torno a capacidad de campo, con una media de $0,33\text{m}^3\text{m}^{-3}$, consideramos que ha sido un riego adecuado para satisfacer las necesidades hídricas de la planta. No se observó ningún efecto negativo en los árboles, de forma que podemos considerar que el cultivo del olivo vegetó adecuadamente, sin problemas de encharcamiento o exceso de agua.

El tratamiento RDC redujo el contenido hídrico del suelo, mostrando durante todo el estudio una media de $0,2\text{m}^3\text{m}^{-3}$, durante la fase del endurecimiento masivo del hueso la media descendió a $0,19\text{m}^3\text{m}^{-3}$ y aumentó durante el periodo de rehidratación con una media de $0,21\text{m}^3\text{m}^{-3}$. Todos los valores medidos estuvieron siempre por encima del punto de marchitez ($0,15\text{m}^3\text{m}^{-3}$), la media más baja en el tratamiento RDC se registró el DDA 229 (16 de agosto) (Moreno *et al.*, 1988).

En el tratamiento RDC la humedad osciló entorno a valores inferiores al tratamiento control, en torno a $0,2 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ desde el periodo del endurecimiento masivo del hueso para aumentar durante el periodo de recuperación.

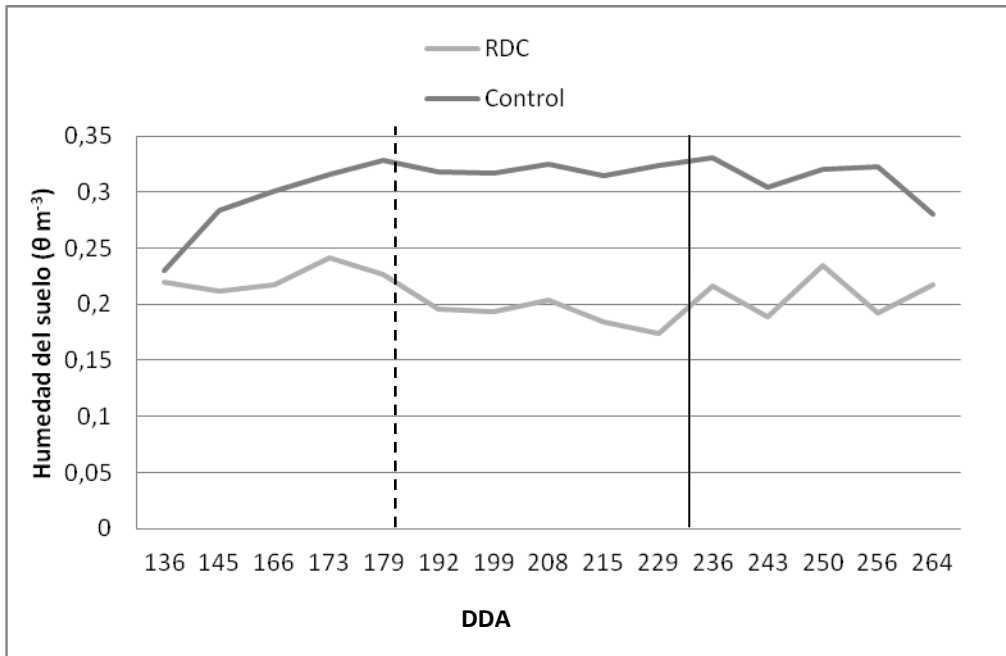


Figura 19. Humedad del suelo registrada en los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.

5.2. Crecimiento y desarrollo.

El crecimiento de los ramos fue continuo durante el periodo de estudio en los dos tratamientos de riego aplicados (Fig. 20), sin apreciarse diferencias significativas entre ambos. Pero a partir de la segunda medida realizada (DDA 156) se observó un crecimiento de ramos menor en el tratamiento RDC. Esta disminución del crecimiento supuso una reducción de un 17% al final del periodo veraniego, el DDA 235 (22 de agosto).

La reducción del crecimiento de los brotes se observó el DDA 156 (4 de junio), en la Fase I, en la que el tratamiento RDC pretendió cubrir las necesidades hídricas del cultivo, de modo que en este periodo no existió déficit hídrico como muestran los valores de potencial hídrico de $-1,2 \text{ MPa}$ (Moriana *et al.*, 2003) (Fig. 23).

Es posible que este menor crecimiento de los ramos en los árboles con tratamientos de riego deficitarios esté relacionado con los riegos aplicados en 2011 (este es un

segundo año de estudio). El riego deficitario aplicado en 2011, produjo un estrés hídrico moderado y no supuso una merma importante en el crecimiento y producción de los árboles, pero ha podido afectar a la formación de yemas, y consecuentemente al crecimiento de los brotes en el periodo de estudio. (Rayo *et al.*, 2008).

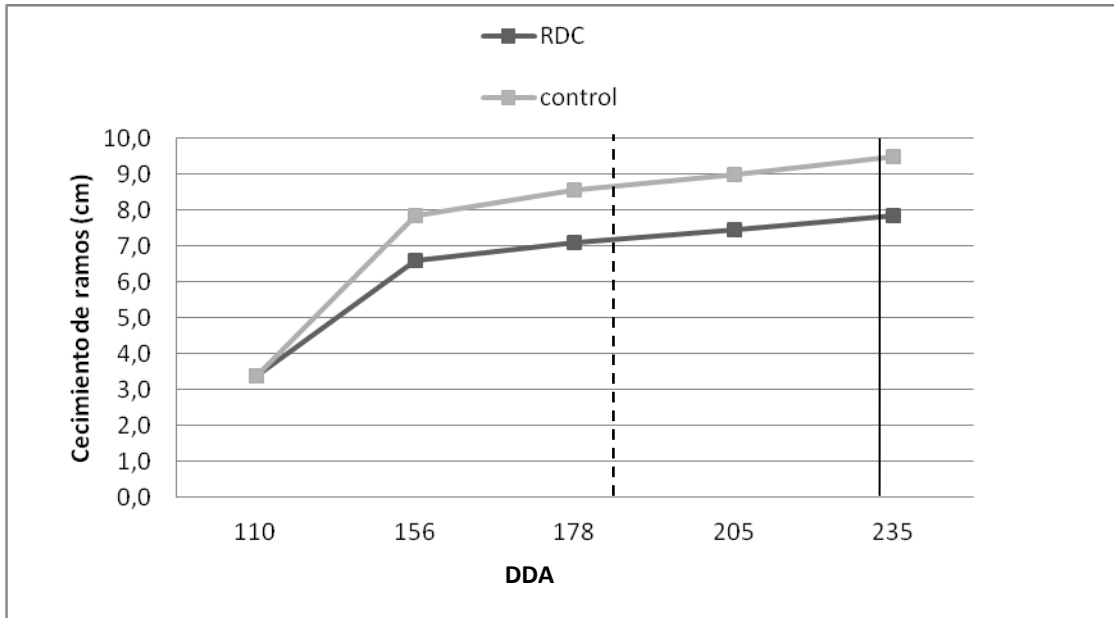


Figura 20. Variación del crecimiento de los ramos (cm) de los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012. ● Diferencias significativas entre los dos tratamientos ($p \leq 0,05$).

----- Comienzo de la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

Se analizaron el número de inflorescencias por brote en cada tratamiento de riego, cómo se aprecia en la Tabla 5 no existieron diferencias significativas, aunque la media de inflorescencias en RDC fue menor que en Control. De modo que según estos resultados el tratamiento RDC aplicado el año anterior no afectó a la inducción floral de manera significativa. Será necesario estudiar la floración de los próximos años, para observar el efecto a largo plazo del RDC, que tal vez podría afectar a la inducción floral del cultivo en años sucesivos.

El cuajado de los frutos produjo una reducción de las inflorescencias por ramo (Tabla 5) en ambos tratamientos, como cabía esperar. Normalmente el cuajado de los frutos en olivo suele ser de un 4% en años de elevada floración y buena cosecha (Rallo y Cuevas, 2008). Pero se apreció un descenso estadísticamente significativo de

infrutescencias en el tratamiento RDC en la medida realizada el DDA 156 (4 de junio), a partir de esta medida el número de inflorescencias se estabilizó en el tratamiento RDC, pero las diferencias con el tratamiento Control continuó hasta el DDA 235 (22 de agosto). A pesar de que en el tratamiento Control se redujeron el número de infrutescencias antes de la recolección.

Estudios anteriores han descrito diferencias significativas en el número de frutos por ramo en años de descarga para estados hídricos similares al nuestro (Moriana *et al.*, 2013). Estas diferencias no se presentaron por el contrario en años de carga como es nuestro caso (Moriana *et al.*, 2013).

Tabla 5. Número de inflorescencias e infrutescencias medias en el periodo de estudio en el año 2012. ● Diferencias significativas entre los dos tratamientos, ns: no existieron diferencias significativas.

DDA	PARAMETRO	CONTROL	RDC	P<0,05
110	Nº inflorescencias	19,72	16,94	ns
156	Nº infrutescencias	4,32	2,36	●
178		4,02	2,36	●
205		3,82	2,36	●
235		3,66	2,36	●

La longitud del fruto (Fig. 21) fue muy similar entre el tratamiento RDC y el Control, no se apreciaron diferencias significativas entre los dos tratamientos de riego. El aumento del tamaño del fruto en longitud fue constante durante todo el periodo de estudio.

Lo que si queda reflejado en la evolución de la longitud del fruto es el cambio de la fase fenológica, el endurecimiento masivo del hueso coincide con una reducción en el crecimiento del endocarpo, y se aprecia un cambio en la velocidad de crecimiento en longitud del fruto (Rapoport *et al.*, 2013). Este cambio en la pendiente se apreció el DDA 180 (28 de Junio). En la primera parte del estudio el crecimiento del fruto fue mayor, a partir del DDA 180, el crecimiento disminuyó, modificándose la pendiente de la curva.

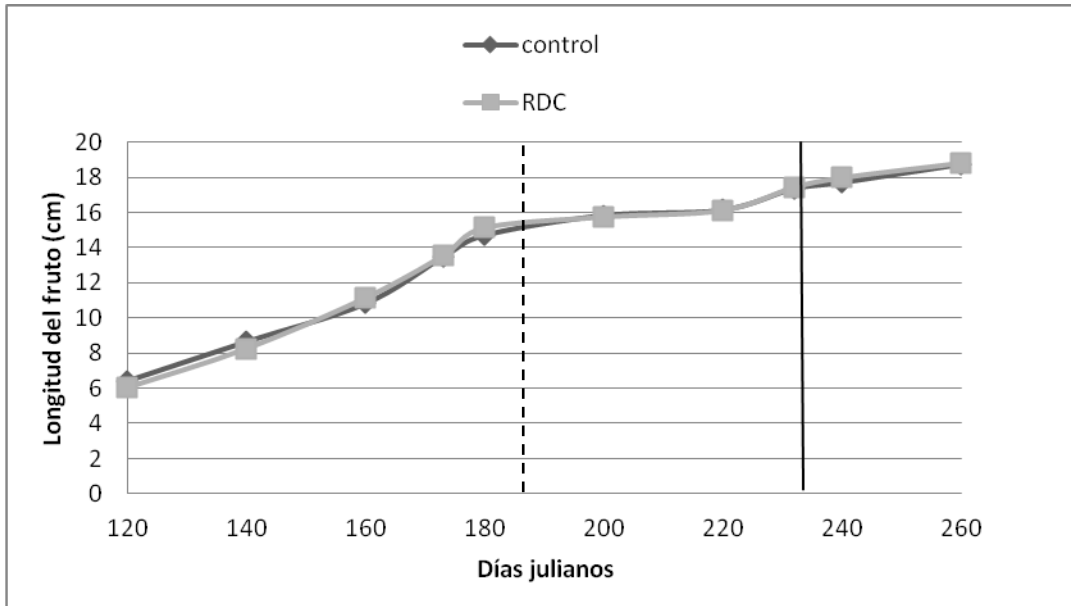


Figura 21. Evolución del tamaño del fruto (cm) en los tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012. ●: Diferencias significativas entre los dos tratamientos ($p \leq 0,05$).

---- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

El aumento del volumen del fruto siguió un crecimiento continuo durante todo el período de estudio en los dos tratamientos (Fig. 22). Aparecieron diferencias significativas en el volumen de fruto en la medida tomada el DDA 240 (27 de agosto), consecuencia del déficit hídrico provocado por el tratamiento RDC que unido a las condiciones climáticas deficitarias (altas temperaturas, altos valores de DPV, baja humedad relativa, menor contenido de humedad en el suelo) afectó al estado hídrico de la planta en el tratamiento RDC, el potencial hídrico del tallo alcanzó $-2,6$ MPa el DDA 240 (Fig. 23), una de las medidas más bajas del periodo de estudio.

En la Fase III, con el riego de rehidratación se recuperó el tamaño del fruto del tratamiento RDC, desaparecieron las diferencias significativas entre los dos tratamientos de riego estudiados. De modo que en el momento de la cosecha la calidad de ambos tratamientos fue similar, el tamaño es uno de los parámetros más importantes en la calidad de la aceituna de mesa (Moriani *et al.*, 2003).

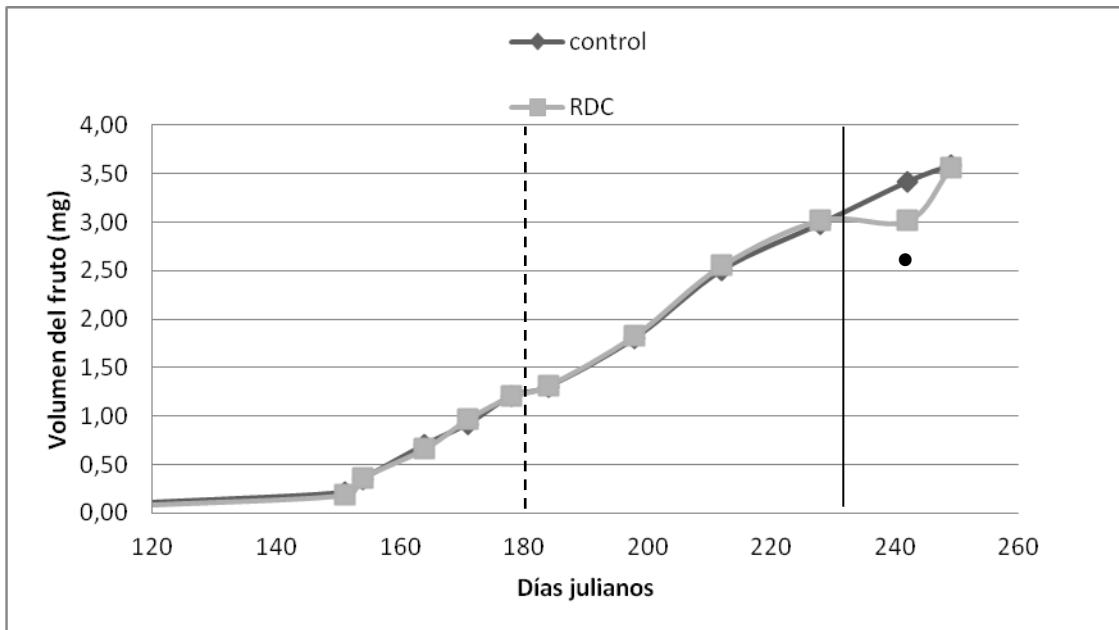


Figura 22. Evolución del volumen del fruto (mg) de los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012. ●: Diferencias significativas entre los dos tratamientos ($p < 0,05$).

----- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

5.3. Relaciones hídricas.

El potencial hídrico de los dos tratamientos de riego aplicados se situó en valores en torno a -1 MPa al inicio de la Fase I, y disminuyó paulatinamente hasta alcanzar valores de -1,4 MPa (Fig. 23). El descenso en ambos tratamientos ocurrió a partir del DDA 145 (24 de Mayo de 2012), momento en el que las temperaturas medias y máximas comenzaron a subir (Fig. 15 y 18) y el déficit de presión de vapor comenzaron a aumentar. Las condiciones climáticas en esta época del año suelen provocar una mayor demanda hídrica en los cultivos, como refleja la disminución del potencial hídrico del tallo.

Durante la Fase I se alcanzaron por tanto valores que consideran un adecuado estado hídrico en olivo, que oscilaron entre -0,8 MPa y -1,4 MPa, Moriana *et al.*, 2002 sugieren valores en torno a -1,6 MPa durante este periodo suponen condiciones de buen estado hídrico y por lo tanto de fotosíntesis máxima.

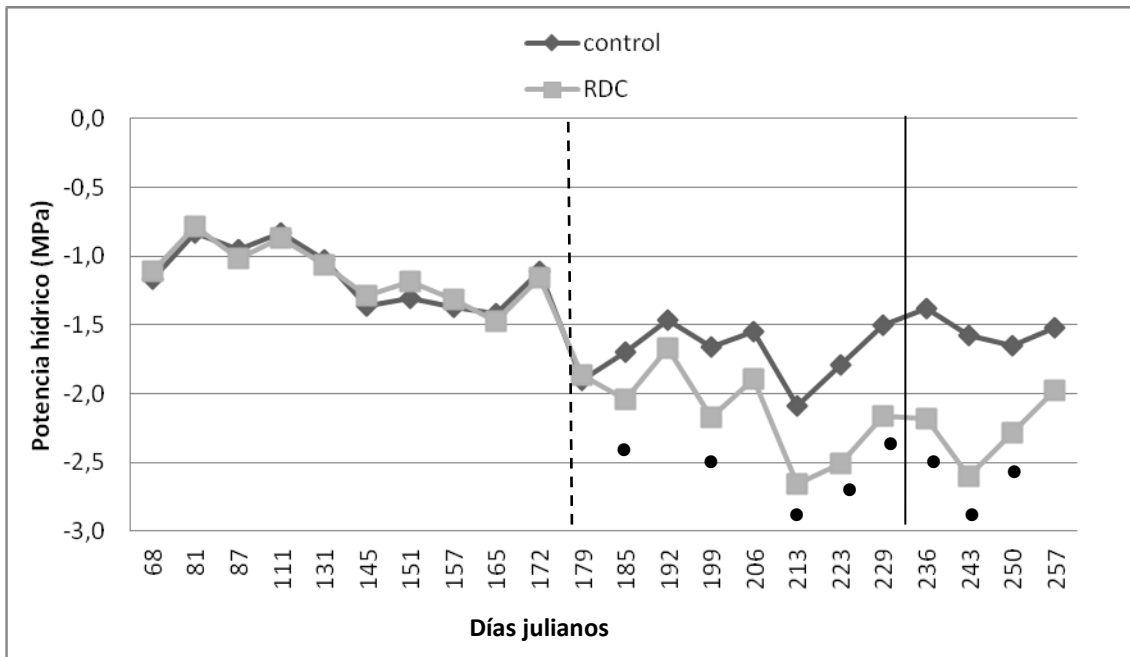


Figura 23. Potencial hídrico (MPa) registrado en los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012. ●: Diferencias significativas entre los dos tratamientos ($p \leq 0,05$).

----- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

El efecto de los tratamientos de riego aplicados comenzó a observarse el DDA 185 (3 de julio 2012), recién iniciada la Fase II, medida en la que comenzaron a apreciarse diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre las medias del potencial hídrico de tallo de los dos tratamientos de riego aplicados, ya que en esta fase de endurecimiento masivo del hueso el tratamiento RDC fue mucho más restrictivo. En el tratamiento RDC el potencial hídrico del tallo descendió paulatinamente hasta alcanzar -2,7 MPa (medida realizada el DDA 213 (31 de julio de 2012)). Estas diferencias se mantuvieron hasta el DDA 257 (13 de Septiembre) (Fig. 23).

El aporte de riego de rehidratación (Fase III) a partir del día 232 (19 de agosto de 2012) permitió a los árboles una cierta recuperación, como se aprecia en las últimas cuatro medidas. En la última medida tomada, previa a la recolección. El DDA 257 (13 de septiembre) desaparecieron las diferencias significativas entre ambos tratamientos con valores de potencial por encima de -2 MPa, la tendencia indicó la recuperación del estado hídrico de los árboles antes de la recolección. Hubiera sido deseable alcanzar valores medios en torno a -1,4 MPa antes de la recolección para alcanzar los umbrales de recuperación recomendados en esta fase (Moriana *et al.*, 2012).

Los valores de potencial hídrico de tallo alcanzados son similares a los obtenidos en anteriores trabajos, se observaron valores máximos en la Fase I cercanos al -0,8 MPa y mínimos durante el endurecimiento del hueso cercanos a -3 MPa (Moriani *et al.*, 2013), que se consideran valores de estrés moderado, que permiten un adecuado estado hídrico del árbol, reducción del agua empleada y no afectaron a la cosecha.

Si observamos los datos podemos ver de forma clara como en el tratamiento Control los valores de potencial hídrico en la fase de endurecimiento masivo del hueso rondaron -1,4 MPa, como se ha señalado un adecuado estado hídrico según Moriani *et al.*, 2012 y en el tratamiento RDC, establecido en función de la señal MCD, durante la fase de endurecimiento del hueso alcanzó un nivel de estrés moderado, con valores por debajo de los -2,5 MPa, y con la fase de rehidratación se obtuvo la recuperación hídrica del cultivo.

La conductancia estomática máxima mostró un comportamiento similar en los dos tratamientos de riego estudiados (Fig. 24), excepto en dos periodos en los que existieron diferencias significativas ($p < 0,05$), entre los dos tratamientos de riego aplicados.

Al comienzo de la fase de estudio el valor de la conductancia estomática fue $0,67 \text{ cm s}^{-1}$ en el caso del tratamiento RDC y $0,50 \text{ cm s}^{-1}$ en el tratamiento Control, al comienzo de la fase de endurecimiento del hueso fue $1,23 \text{ cm s}^{-1}$ en el caso RDC y levemente mayor en el tratamiento Control.

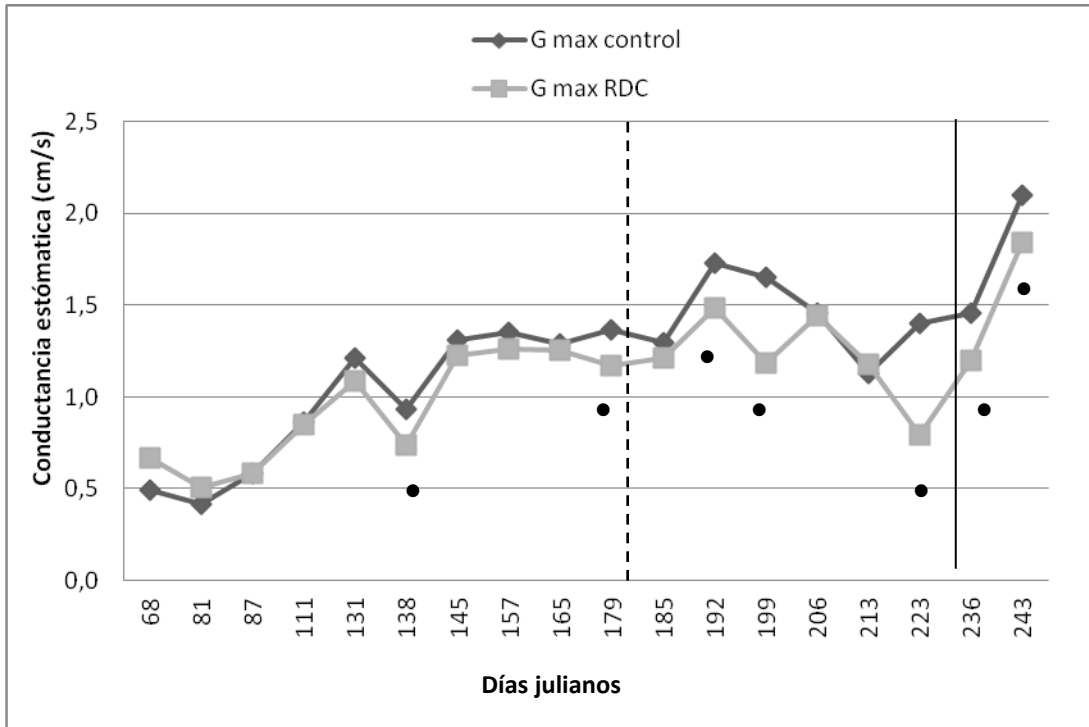


Figura 24. Evolución de la conductancia estomática máxima (cm/s) en los tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río en el verano de 2012. ● Diferencias significativas entre los dos tratamientos.

----- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

La conductancia estomática máxima alcanzó valores normales en olivo (Moriana *et al.*, 2013), con valores en torno a $0,5 \text{ cm s}^{-1}$ en las primeras medidas realizadas los DDA 68, 81 y 87 (8, 21 y 27 de marzo de 2012). Con la mejora de las condiciones climáticas y el aumento de la demanda evapotranspirativa la conductancia estomática aumento en los dos tratamientos de riego alcanzando valores en torno a $1,3 \text{ cm s}^{-1}$ a finales de la Fase I. Es en la Fase II, al aplicar una dosis de riego deficitario más restrictiva, comenzamos a observar una disminución de la conductancia estomática en algunas de las medidas realizadas durante esta fase, los DDA 192 Y 199 (10 y 17 de julio de 2012) se observaron diferencias significativas entre las medias de ambos tratamientos de riego, que posteriormente desaparecieron, hasta la medida realizada el DDA 223 (10 de agosto de 2012), las diferencias significativas se mantuvieron hasta el final del estudio. Con la fase de rehidratación los valores de conductancia estomática aumentaron en ambos tratamientos, por la mejora del estado hídrico de la planta y las condiciones climáticas, a pesar de que se mantuvieron diferencias significativas entre ambas. La conductancia estomática es un parámetro del estado hídrico del cultivo muy

dependiente de las condiciones climáticas y con frecuencia muestra mucha variabilidad en función de la demanda evapotranspirativa.

La tasa de crecimiento diario del tronco mostró un comportamiento muy similar en los dos tratamientos (Fig. 26). Con grandes variaciones al inicio del estudio, debidas a sucesos de precipitación, como el máximo registrado el DDA (30 de marzo de 2012) que coincidió con unos de los días de mayor precipitación. Las precipitaciones producen un ensanchamiento en el tronco, por la hidratación de la corteza externa del tronco, que son sucedidas de grandes bajadas, que tienen lugar en el periodo posterior a las precipitaciones y están relacionadas con el secado del tronco.

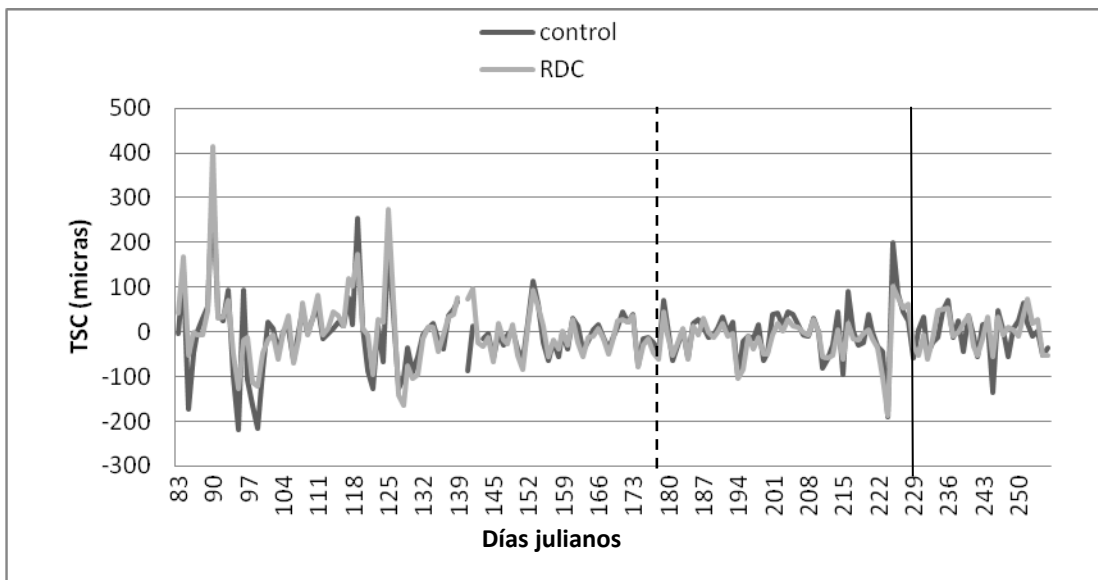


Figura 25. Tasa de crecimiento de los tratamientos aplicados, en Coria del Río, en el periodo de durante el verano 2012.

----- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

Los datos medios de crecimiento diario del tronco nos mostraron un crecimiento negativo en ambos tratamientos (tabla 6) durante la Fase I, mayor en el tratamiento deficitario. Estos valores están muy influenciados por las precipitaciones, que en esa fase son habituales en nuestra zona geográfica y que ocurrieron de manera intermitente hasta el DDA 149 (28 de Mayo) (Fig. 17).

Durante la Fase II la TCT diaria mantuvo valores negativos en ambos tratamientos, que en el caso RDC alcanzaron una media $-15,45 \mu\text{m.día}^{-1}$ en el tratamiento RDC, aplicado en base a la señal de MCD de 0,75.

En la Fase III se observó una recuperación en la media de la TCT en el tratamiento Control y un aumento sustancial, pasando a valores positivos en el tratamiento RDC con una media de $6,06 \mu\text{m.día}^{-1}$.

Tabla 6. Valores medios de la tasa de crecimiento diaria en las diferentes fases de los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.

	CONTROL (μm)	RDC (μm)
FASE 1	-5,32	-11,99
FASE 2	-4,22	-15,45
FASE 3	-2,45	6,06

En la Figura 26 se ha representado la tasa de crecimiento acumulada, considerando las fechas a partir de la finalización de las precipitaciones, para evitar el efecto que producen sobre la tasa de crecimiento acumulada.

Nos interesa destacar las pendientes de la tasa de crecimiento acumulada, los valores absolutos no resultan tan interesantes, como hemos visto por su gran variabilidad. Podemos observar una primera fase en la que la pendiente es muy baja, y muy similar en ambos tratamientos. Con una media de $-176,30 \mu\text{m}$ en el tratamiento Control y de $-238,53 \mu\text{m}$ en el RDC (Tabla 7).

Una segunda etapa coincidiendo con el endurecimiento masivo del hueso y la aplicación del riego deficitario en el que el tratamiento Control tiene una pendiente negativa, pero muy baja, prácticamente no ha existido crecimiento, con una media de $435,57 \mu\text{m}$ (tabla 8). En años de carga, como fue nuestro caso, durante la fase de endurecimiento masivo del hueso se produce una disminución del crecimiento del tronco por la demanda de los frutos que actúan como sumidero de agua y nutrientes (Moriana *et al.*, 2003, Pérez- López *et al.*, 2008).

El RDC descendió de manera importante con una media de TCT de $-880,25 \mu\text{m}$, pasando de $-500 \mu\text{m}$ al inicio de la Fase I a $-1300 \mu\text{m}$ al final del periodo,

probablemente muy influenciado por el estado hídrico de la planta, ya que el RDC fue viéndose afectado por el estrés hídrico, unido al efecto de la carga de la fruta. Este efecto se apreció en ambos tratamientos.

Se observó en la Fase III una estabilización de la TCT en ambos tratamientos, que se mantuvieron en una media de $-466,10$ y $-1137,14$ μm el Control y el RDC respectivamente (Tabla 7).

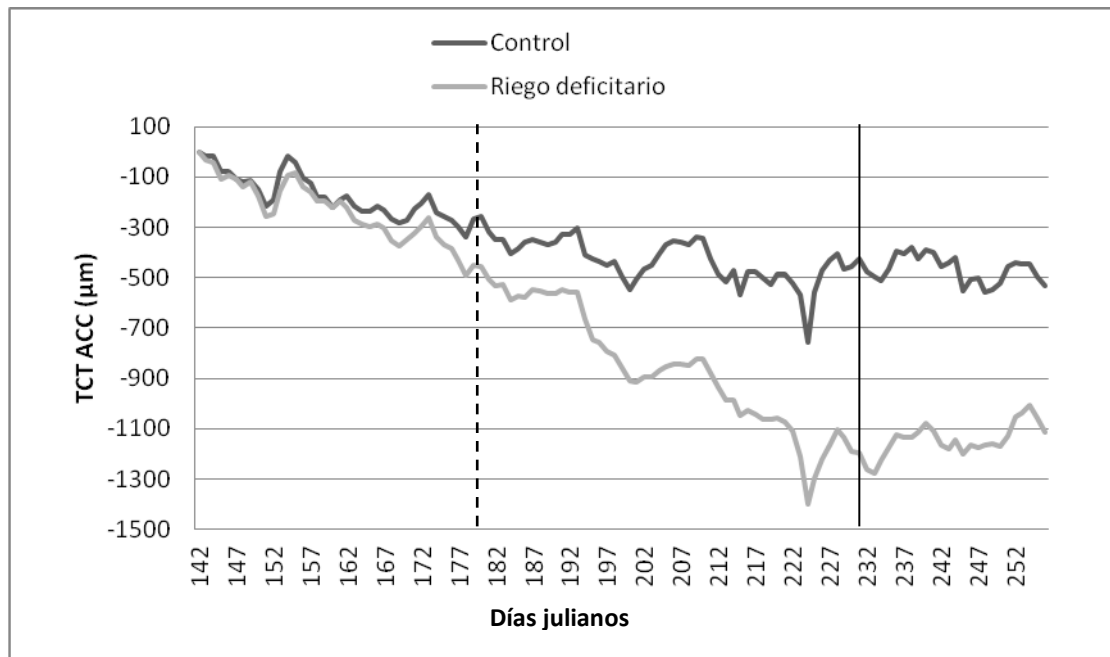


Figura 26. Tasa de crecimiento acumulada de los dos tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.

----- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

Tabla 7. Valores medios de la tasa de crecimiento acumulada en las diferentes fases de los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.

	Control (μm)	RDC (μm)
1ª fase	-176,30	-238,53
2ª fase	-435,57	-880,25
3ª fase	-466,10	-1137,14

La máxima contracción diaria (MCD, diferencia entre máximo y mínimo diarios) (Fig. 27) mostró un aumento progresivo de sus valores con el transcurso del tiempo durante la Fase I en ambos tratamientos de riego, donde se registró una media de $304,92$ μm

en Control y 313,19 μm en RDC (Tabla 8). En la Fase II se observó una gran variabilidad en ambos tratamientos de riego, si observamos las medias registradas (Tabla 8) podemos ver que el RDC mantuvo valores algo superiores, como muestra la media del periodo. En la fase de rehidratación (Fase III) se observó una reducción de la MCD, como muestran las medias del periodo para cada tratamiento (Tabla 6).

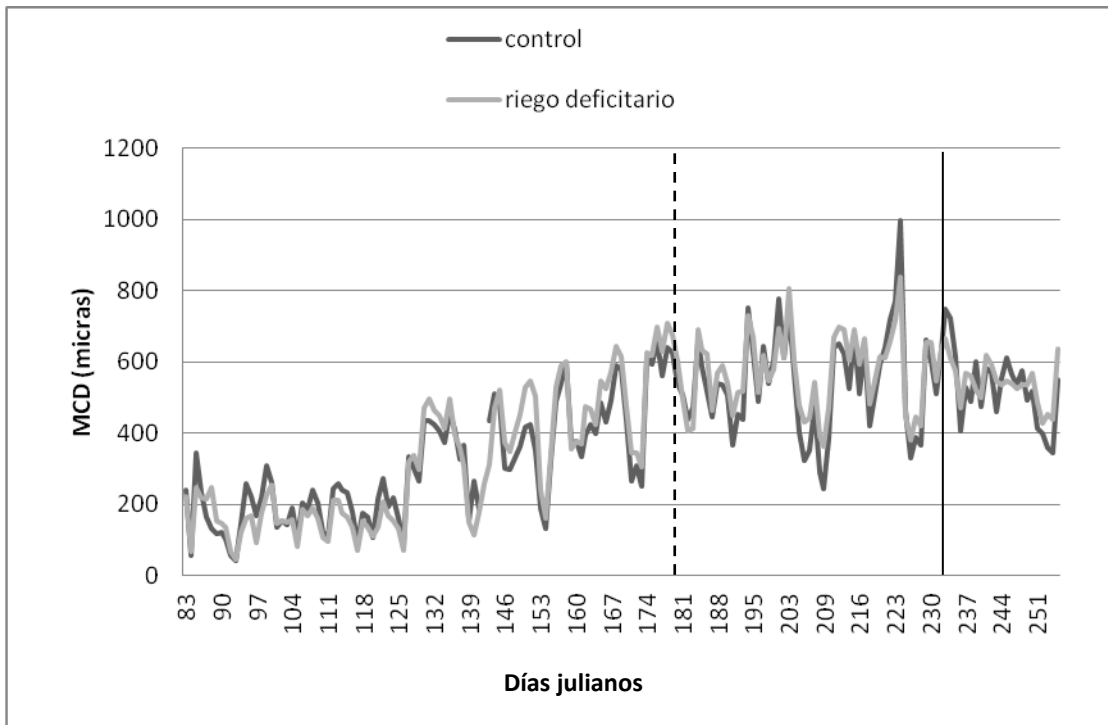


Figura 27. MCD de los dos tratamientos realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.

----- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

Los valores máximos de MCD tuvieron lugar en los dos tratamientos el DDA 224 (11 de agosto de 2012) con valores de 837,2 μm en el tratamiento Control y 998,1 μm en el RDC, y el mínimo se observó el DDA 93 (2 de abril de 2012) con valores de 43,8 μm en el tratamiento Control y 47,6 μm en el RDC. La MCD es un parámetro muy variable e íntimamente relacionado con la demanda evapotranspirativa del cultivo.

Autores como Moriana *et al.*, 2011 señalan la relación lineal de la MCD y la temperatura máxima diaria; los valores más bajos de MCD (menor contracción) se registraron en el periodo de tiempo en el que los valores medios de la temperatura fueron inferiores al igual que sucedió con los valores de déficit de presión de vapor. Lo

mismo sucedió con el valor máximo (máxima contracción) de MCD que coincidió con los días de mayor temperatura máxima y con valores elevados de déficit de presión de vapor.

Tabla 8. Valores medios de la máxima contracción diaria en las diferentes fases de los dos tratamientos de riego realizados en Coria del Río en el periodo de estudio del año 2012.

	MCD CONTROL	MCD RDC
FASE 1	304,91	313,19
FASE 2	541,68	570,96
FASE 3	527,57	541,67

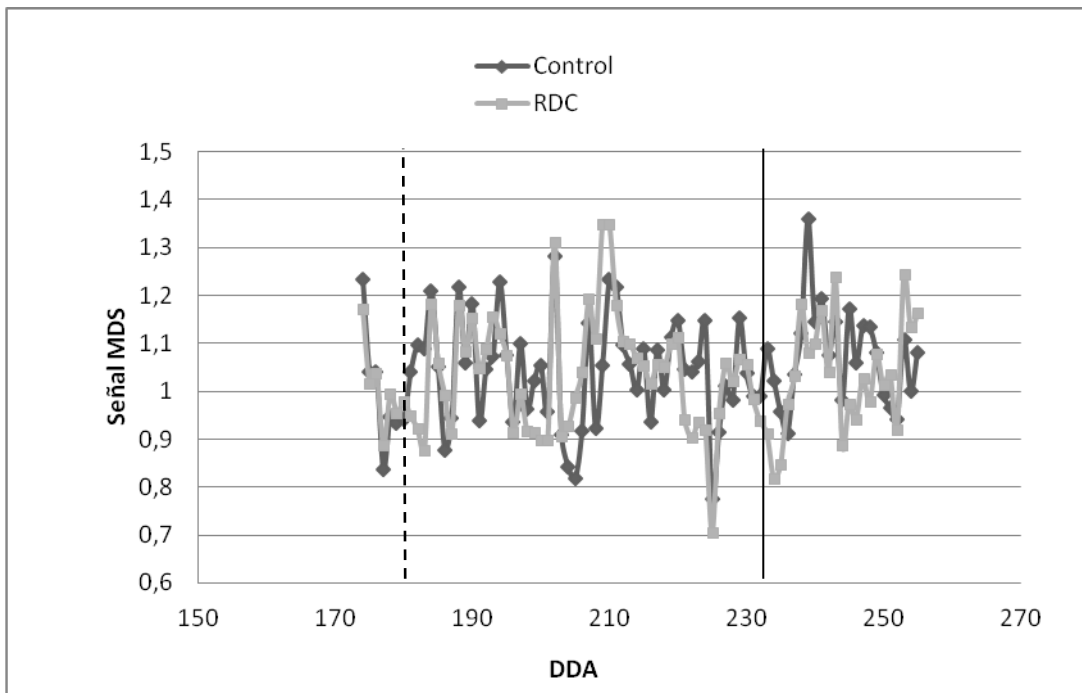


Figura 28. Señal MCD en los tratamientos de riego aplicados, en Coria del Río, durante el verano 2012.

----- Comienzo la segunda fase de riego. — Comienzo de la tercera fase de riego.

Los valores de la señal MCD fueron similares entre ambos tratamientos, se mantuvieron siempre cercanos a 1 (Fig. 28). Durante la fase de endurecimiento masivo de hueso la media de la señal MCD fue de 1,032 en RDC y de 1,037 en Control, y en la fase de rehidratación 1,035 y 1,076 respectivamente.

Se considera estrés cuando la señal de MCD es inferior a 1, durante la FASE II de endurecimiento masivo de hueso se observaron valores de señal de MCD inferiores a 1 en tres periodos: los DDA 196-201 (entre el 14 y el 19 de julio de 2012) con un valor promedio de 0,92, el periodo del 203-205 DDA (del 21 al 23 de julio de 2012) con una media de 0,94 y el periodo de DDA 221-226 (del 8 al 13 de agosto de 2012) con un valor promedio de 0,89 de señal de MCD. Estos tres periodos señalan los momentos en los que los árboles han sufrido estrés hídrico, como podemos apreciar en los valores de potencial hídrico medidos en esas fechas (Fig. 23).

Nuestro objetivo era emplear como umbral de riego la señal de MCD en la fase de endurecimiento masivo del hueso, para ello nos propusimos un umbral de 0,75 de señal. Una primera consideración es que la señal de MCD solo estuvo un día por debajo de ese umbral, el DDA 225 (12 de agosto de 2012), y si nos sirvió para aplicar un nivel de estrés moderado como muestran las medias de potencial hídrico del tallo (Fig. 23). Pero no ha existido un comportamiento diferente entre la señal de MCD del tratamiento Control y el tratamiento RDC, de modo que la señal de MCD no es un parámetro lo suficientemente sensible como para diferenciar el estado hídrico de la planta con los niveles de estrés que hemos manejado en este ensayo.

Trabajo previos han descrito en Olivo que la MCD es muy poco sensible a condiciones de estrés hídrico moderado, dando valores prácticamente idénticos de este parámetro entre tratamientos claramente diferentes desde el punto de vista hídrico (Mariana y Fereres, 2002; Mariana *et al.*, 2003; Mariana *et al.*, 2010). En nuestro caso hemos alcanzado un nivel de estrés moderado, a pesar de que hemos descendido a valores de potencial hídrico de tallo inferiores a -2 MPa, las diferencias entre los dos tratamientos no han sido elevadas. Coincidiendo con los resultados de Mariana *et al.*, 2000, según el cual es necesaria una disminución de la MCD del RDC severa respecto de árboles Control para establecer diferencias claras.

La MCD medida en los árboles y la estimada con la línea base mantuvieron una relación lineal en los dos tratamientos (Fig. 29), en el tratamiento RDC la relación es de $MCD\ medida = -0,7276\ MDC\ estimada + 162$, $R^2 = 0,676$ estadísticamente significativa. En el caso de los árboles Control se ajustaron a la ecuación $MCD = 1,0626\ MCD$

estimada – 0,608, $R^2= 0,8274$, estadísticamente significativa. El análisis estadístico entre ambas ecuaciones no mostro diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre las pendientes y si en los términos independientes de ambas rectas.

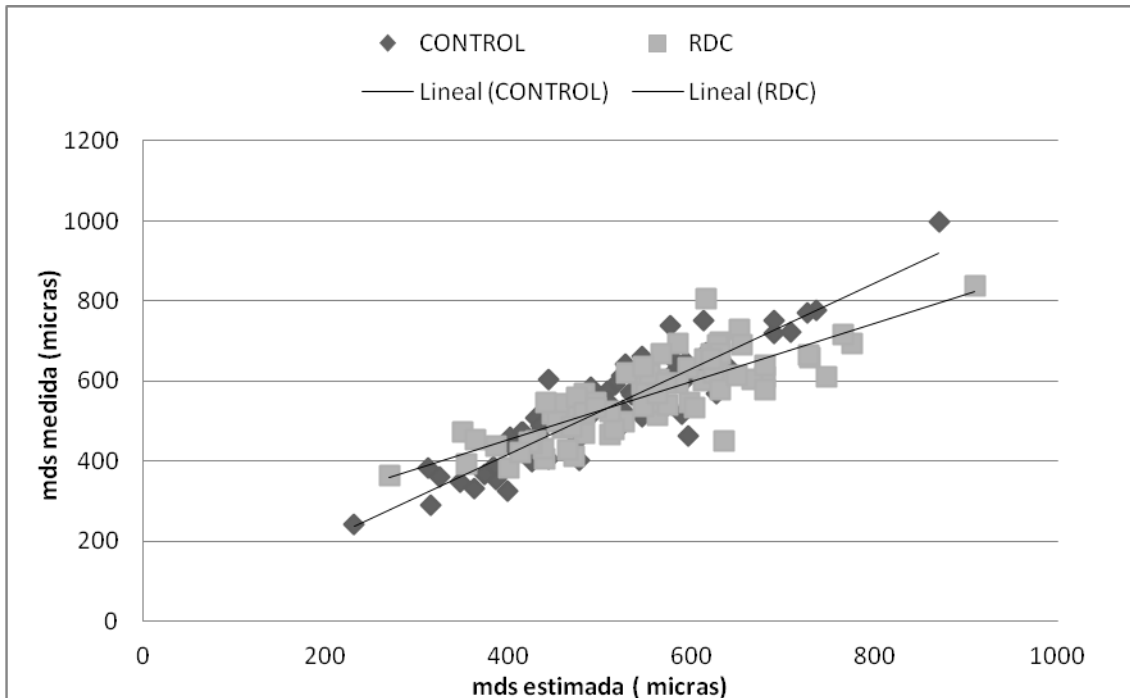


Figura 29. Relación entre la MCD estimada y la MCD calculada en la fase de endurecimiento masivo del hueso en el tratamiento de riego deficitario.

5.4. Producción y calidad.

La producción ha sido alta, con una media de $5,99 \text{ kg ha}^{-1}$ y $29,38 \text{ kg}$ por árbol en el tratamiento RDC y $9,74 \text{ kg ha}^{-1}$ y $47,68 \text{ kg}$ por árbol en el tratamiento Control (Tabla 9). A pesar de que la media de kg de fruto por árbol del tratamiento Control fue un 39% mayor que en el tratamiento RDC, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas que pudiéramos atribuir a los tratamientos de riego aplicado. Se observó un comportamiento similar en la producción en kg ha^{-1} , el análisis estadístico no mostró diferencias, a pesar de que la media de kg ha^{-1} fuera menor en el RDC. Podemos considerar que el año 2012 fue un año de carga alta comparado con los datos de producción del primer año de estudio (2011, datos no mostrados). Nos encontramos con una parcela de vecería muy pronunciada, y una elevada variabilidad entre árboles, como muestra el error estándar de la media de la cosecha (Tabla 9). El tratamiento RDC parece haber tenido un efecto positivo sobre la variabilidad y la

vecería, al reducir el crecimiento de brotes, y la cosecha del año, es posible que en las cosechas de años sucesivos se aprecie un efecto sobre la diferencia de carga entre los distintos años, muy habitual en olivo. Pero serán necesarios estudios sucesivos para despejar esta incógnita.

Tabla 9. Medias de la producción (Kg/árbol y Kg/ha), y calidad: escandallo (número de frutos por Kg) e Índice de madurez de los frutos (I.M.) y agua aplicada (mm) en los tratamientos de riego (RDC y Control) durante el verano 2012. Los valores son la media de 5 árboles en cada tratamiento. E.S. error estándar.

Trat.	Producción				Calidad			Agua Aplicada
	Kg árbol ⁻¹	E.S.	Kg ha ⁻¹	E.S.	Escandallo	E.S.	I.M	
RDC	29,38	±3,04	5,99	±0,62	276,95	±18,95	0,81	70,70
Control	47,68	±8,06	9,73	±1,64	286,75	±15,85	0,93	434,25

El escandallo fue muy similar en ambos tratamientos (Tabla 7), el análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en el tamaño de fruto, de modo que podemos afirmar que el RDC no afectó a la calidad del fruto. La media del tratamiento RDC fue sensiblemente menor, tal vez por la menor carga que tuvieron esos árboles.

Los índices de madurez (0,81 en el RDC y 0,93 en Control) fueron inferiores a uno (Tabla 9) lo que indica que la recolección se realizó en el momento adecuado. El índice óptimo de madurez para el aderezo típico sevillano de aceituna de mesa es 1. Si comenzara a virar el color, el índice de madurez se acercaría a 2.

No existieron diferencias significativas en el índice de madurez entre los dos tratamientos de riego aplicados (Tabla 9), lo que demuestra que el tratamiento deficitario no afectó a la velocidad de maduración y no adelantó el cambio de color del fruto.

6. CONCLUSIONES.

Una vez expuestos los datos y los resultados obtenidos en campo podemos concluir:

- 1.- El uso de líneas base de referencia permitió aplicar un riego deficitario controlado a nivel de finca en olivo para aceituna de mesa en función de la señal MCD.
- 2.- Según los datos obtenidos en un segundo año de estudio esta técnica permite reducir el riego considerablemente y mantener un estado hídrico de estrés moderado.
- 3.- La señal MCD no ha servido para diferenciar el estado hídrico de los olivos en ambos tratamientos de riego. La TCT se ha mostrado más sensible como parámetro ajustándose mejor al estado hídrico de la planta.
- 4.- Consideramos necesarios estudios sucesivos para afianzar los resultados y poder observar si el estrés hídrico que provoca una merma de crecimiento y producción en árboles sometidos a este régimen hídrico de manera reiterada.

7.BIBLIOGRAFÍA.

Agencia Estatal de Meteorología. AEMET. (2012). Valores climatológicos normales. <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>.

Barranco, D.; (2008). Capítulo 3: Variedades y Patrones. En: El cultivo del olivo (D. Barranco, Fernández-Escobar, R.; Rallo, L.; eds.). Mundiprensa, Madrid, pp 63-92.

Brought, D.W.; Jones, H.G.; Grace, J. (1986). Diurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation. *Plant, Cell & Environment* 9, 1-7.

Carr, M.K.V. (2013) The water relations and irrigation requirements of olive (*Olea europaea* L.): A review. *Experimental Agriculture* 49 (4) 597-639.

Cohen, M. (1992). Optimización del riego a través de la utilización de indicadores de stress hídrico en el árbol. *Horticultura profesional*. 45.

Conejero, W., Alarcón, J.J., Garcia-Orellana, Y., Nicolás, E., Torrecillas, A., (2007) Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors used for irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Tree Physiology* 27, 1753–1759.

Connor, D.J. (2005) Adaptation of olive (*olea europaea*) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural research* 56(11): 1181-1189.

Dell'Amico, J.; Moriana, A.; Corell M.; Girón, I.F.; Morales, D.; Torrecillas, A.; Moreno. F. 2013. Low water stress conditions in table olive trees (*Olea europaea* L.) during pit hardening produced a different response of fruit and leaf water relations. *Agricultural Water Management* 114 (2012) 11– 17.

Farooqi A.H.A., Ansari S.R., Kumar R., Sharma S., Fatima S. 1998. Response of different genotypes of Citronella Java (*Cymbopogon winterianus* Jowitt) to water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. New Delhi 25:172-175.

FAOSTAT (2012). <http://www.faostat.fao.org/corp/statistics/es>.

Fereres, E., Goldhamer, D.A., 2000. Avances recientes en la programación de los riegos. *Ingeniería del agua* · 7 · 1, 47-54.

Fernández, J.E.; Cuevas, M.V. (2010) Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology* 150 (2) 135–151.

Fernández, J.E.; Díaz-Espejo, A.; Infante, J.M.; Durán, P.; Palomo, M.J.; Chamorro, V.; Girón, I.F.; Villagarcía, L.; (2006). Water relations and gas Exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant Soil* 284,273-291.

Ferreira E., Selles G., Peralta J., Burgos L., Valenzuela J. (2001). Effect of water stress applied at different development periods on Cabernet Sauvignon grapevine on production and wine quality. III Encuentro de las aguas, Santiago de Chile.

Goldhamer, D.A.; Fereres, E.; Mata, M.; Girona, J.; Cohen, M.; (1999). Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 124, 437-444.

Goldhamer, D.A.; Fereres, E. (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20, 115-125.

Goldhamer, D.A., Fereres, E., Salinas, M., (2003). Can almond trees directly dictate their irrigations needs?. *California Agriculture* 57, 138–144.

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

Hanson A.D., Hitz W.D. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Annual Review of Plant Physiology* 33: 163-203.

Hermoso, M.; Uceda, M.; Frías, L.; Beltrán, G. (2006). Maduración En: Barranco, D.; Fernández-Escobar, R.; Rallo, L. (Eds.), *El cultivo del olivo*. Mundiprensa, Madrid, 137 – 153.

Hsiao, T. C. (1973) Plant Responses to Water Stress. *Annual Review of Plant Physiology* 24: 519-570.

Informe de Medio Ambiente en Andalucía. (2012). Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.

Lambers, H. (1987). Does variation in photosynthetic rate explain variation in growth rate and yield? *Neth. Journal of Agricultural Science* 35: 505-519.

Lavee, S y Wodner, M. (1991). Factors affecting the nature of oil accumulation in fruit of olive (*Olea europaea* L) cultivars. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 66, 583-591.

Lawlor D.W., Cornic G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ.* 25: 275-294.

- Lichtenthaler H.K., (1996). Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *Journal of Plant Physiology* 148: 4-14.
- MAGRAMA. (2011). Anuario de estadística agraria varios años.
- MAGRAMA. (2013). Informe de Regadíos en España, 2013.
- Medrano H., Escalona J.M., Bota J., Gulías J., Flexas J. (2002). Regulation of photosynthesis in C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany* 89: 895-905.
- Morgan J.M. (1984). Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 35: 299-319.
- Mohr H., Schopfer P. (1995). *Plant Physiology*. Ed. Springer Verlag, Berlin
- Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F., Torrecillas, A., (2006). Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management* 84, 290–294.
- Moreno, F.; Vachaud G.; Martín-Aranda, J.; Vauclin M.; Fernández E. (1988) Balance hídrico de un olivar con riego gota a gota. Resultados de cuatro años de experiencias. *Agronomie* (6), 521-537.
- Mori B., Serra G., Tognoni F. 1995 Growth response to different water regimes of container grown woody ornamentals. *Agricultura Mediterranea* 125: 368-374.
- Moriana, A.; Corell, M.; Girón, I.F.; Conejero W., Morales, D.; A. Torrecillas; Moreno, F; 2013. Regulated deficit irrigation based on threshold values of trunk diameter fluctuation indicators in table olive trees. *Scientia Horticulturae* 164 (2013) 102–111.
- Moriana, A. y Fereres, E. (2002). Plant indicator for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrigation Science* 21, 83-90.
- Moriana, A. y Fereres, E. (2004). Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Horticulturae* 664:407-412.
- Moriana, A.; Fereres, E.; Orgaz, F.; Castro, J.; Humanes, M.D.; Pastor, M. (2000). The relations between trunk fluctuations and tree water status in olive tree (*Olea europaea* L). *Acta Horticulturae* 537:293-297.
- Moriana, A.; Orgaz, F.; Fereres, E.; Pastor, M. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 128, 425-431.

Moriana, A.; Gijón, M.C.; Pérez-López, D. (2008). Influence of irrigation rate on the rehydration of olive tree plantlets. *Agricultural Water Management* 95, 1161-1166.

Moriana, A.; Girón, I.; Martín-Palomo, M.J.; Conejero, W.; Ortuño, M.F.; Morales, D.; Corell, M.; Torrecillas, A.; (2011). Seasonal changes of maximum daily shrinkage reference equations for irrigation scheduling in olive trees: influence of fruit load. *Agricultural water management*. 99: 121-127.

Moriana, A., Pérez-López, D., Corell, M., Prieto, M.H., Ramírez-Santa-Pau, M., Pérez-Rodríguez, J.M., Girón, I., Moreno, F, 2012. Programación del riego en olivar basada en medidas en el árbol. Presente y Futuro. *Revista de hortofruticultura* nº 24.

Moriana, A.; Pérez-López, D.; Prieto, M.H.; Ramírez-Santa-Pau, M.; Pérez- Rodríguez, J.M. (2012). Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. *Agricultural Water Management*. 112:43-54.

Mudarra, J.L (1988). Reconocimiento de los suelos de la comarca del El Aljarafe (Sevilla). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 126 pp.

Orgaz, F. y Fereres, E. (2008). Riego. En: *El cultivo del olivo*. (D. Barranco, R. Fernández Escobar and L. Rallo, eds). Mundiprensa, Madrid. Pp. 337-363.

Orgaz, F.; Testi, L.; Villalobos, F.J.; Fereres, E. (2006). Water requirements of olive orchard-II: determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrigation Science* 24, 77-84.

Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W., Torrecillas, A., (2009) Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential baselines for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* 27, 121–127.

Ortuño, M.F.; Conejero, W.; Moreno, F.; Moriana, A.; Intrigliolo, D.S.; Biel, C.; Mellisho, C.D.; Pérez-Pastor, A.; Domingo, R.; Ruiz-Sánchez, M.C.; Casadesus, J.; Bonany, J.; Torrecillas, A.; (2010). Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling?. A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management* 97:1-11

Parra R.A., Rodríguez J.L., González A.G. (1999). Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico. *Terra*, 17:2.

Pastor, M.; Fereres, E.; García- Vila, M.; Soriano, M.A.; Vega, V. (2007). Productivity of olive orchards in response to tree density. *IFAPA. Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 82: 555-562.

Pérez-López, D.; Moriana, A.; Rapoport, H.; Olmedilla, N.; Ribas, F. (2008). New approach for using trunk growth rate and endocarp development in the irrigation scheduling of Young olive orchards. *Scientia Horticulturae* 155:244-251.

Rallo, L y Cuevas J. (2008). Fructificación y producción. En El cultivo del olivo (D. Barranco, Fernández- Escobar, R., Rallo, L., eds.). MundiPrensa, Madrid 104-136.

Rapoport, H.F.; (2008). Capítulo 2: Botánica y Morfología. En: El cultivo del olivo (D. Barranco, Fernández-Escobar, R.; Rallo, L.; eds.). Mundiprensa, Madrid, pp 37-62.

Rapoport, H.F.; Pérez- López, D.; Hammami, S.B.M.; Agüera, J.; Moriana, A. (2013). Fruit pit hardening: physical measurement during olive fruit growth. *Annals of Applied Biology* 163 (2) 200–208.

Shackel, K.A.; Ahmadi, H.; Biasi, W.; Buchner, R.; Goldhamer, D.; Gurusinghe, S.; Hasey, J.; Kester, D.; Krueger, B.; Lampinen, B.; McGourty, G.; Micke, W.; Mitcham, E.; Olson, B.; Pelletrau, K.; Philips, H.; Ramos, D.; Schawanki, L.; Sibbett, S.; Snyder, R.; Southwick, S.; Stevenson, M.; Thorpe, M.; Weinbaum, S.; Yeager, J. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology* 7, 23-29.

Stewart, W.; Fulton, A.; Krueger, W.; Lampinen, B; Shackel, K. (2011). Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. *California Agriculture* 65(2):90-95.

Salisbury F., Ross C. (1991). *Plant Physiology*, Four edition. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.

Schulze E.D. 1986. Whole plant responses to drought. *Australian Journal of Plant Physiology* 13: 127-141.

Turner, N.C. (1981). Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil* 58, 339-366.

Turner N.C., Jones M.M. (1980). Turgor maintenance by osmotic adjustment: A review and evaluation. In: Turner N.C. & P.J. Kramer. eds. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. John Wiley & Sons, New York, USA. pp. 87-103.