



**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN AGRO-FISIOLÓGICA DE LA  
COMBINACIÓN DE AGUAS DE DIFERENTE CALIDAD  
EN CÍTRICOS**

**D. José María Bayona Gambín**

**2023**





**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
**ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**  
**TESIS DOCTORAL**

**EVALUACIÓN AGRO-FISIOLÓGICA DE LA COMBINACIÓN DE  
AGUAS DE DIFERENTE CALIDAD EN CÍTRICOS**

**Autor: D. José María Bayona Gambín**

Director/es: D. Emilio Nicolás Nicolás

D. Juan José Alarcón Cabañero





**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD  
DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

*Aprobado por la Comisión General de Doctorado el 19-10-2022*

D./Dña. José María Bayona Gambín

doctorando del Programa de Doctorado en

Biología Vegetal

de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Murcia, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y titulada:

**EVALUACIÓN AGRO-FISIOLÓGICA DE LA COMBINACIÓN DE AGUAS DE DIFERENTE CALIDAD EN CÍTRICOS**

y dirigida por,

D./Dña. Emilio Nicolás Nicolás

D./Dña. Juan José Alarcón Cabañero

D./Dña.

**DECLARO QUE:**

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

*Si la tesis hubiera sido autorizada como tesis por compendio de publicaciones o incluyese 1 o 2 publicaciones (como prevé el artículo 29.8 del reglamento), declarar que cuenta con:*

- *La aceptación por escrito de los coautores de las publicaciones de que el doctorando las presente como parte de la tesis.*
- *En su caso, la renuncia por escrito de los coautores no doctores de dichos trabajos a presentarlos como parte de otras tesis doctorales en la Universidad de Murcia o en cualquier otra universidad.*

Del mismo modo, asumo ante la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada, en caso de plagio, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Murcia, a 12 de septiembre de 2023

Fdo.:

*Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en la primera página de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor.*

Información básica sobre protección de sus datos personales aportados	
Responsable:	Universidad de Murcia. Avenida teniente Flomesta, 5. Edificio de la Convalecencia. 30003; Murcia. Delegado de Protección de Datos: dpd@um.es
Legitimación:	La Universidad de Murcia se encuentra legitimada para el tratamiento de sus datos por ser necesario para el cumplimiento de una obligación legal aplicable al responsable del tratamiento. art. 6.1.c) del Reglamento General de Protección de Datos
Finalidad:	Gestionar su declaración de autoría y originalidad
Destinatarios:	No se prevén comunicaciones de datos
Derechos:	Los interesados pueden ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación, oposición, limitación del tratamiento, olvido y portabilidad a través del procedimiento establecido a tal efecto en el Registro Electrónico o mediante la presentación de la correspondiente solicitud en las Oficinas de Asistencia en Materia de Registro de la Universidad de Murcia





## TESIS DOCTORAL

### **EVALUACIÓN AGRO-FISIOLÓGICA DE LA COMBINACIÓN DE AGUAS DE DIFERENTE CALIDAD EN CÍTRICOS**

José María Bayona Gambín

Murcia, 2023

Directores:

Dr. Emilio Nicolás Nicolás

Dr. Juan José Alarcón Cabañero



## Índice

<b>PREÁMBULO</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO I. RESUMEN Y OBJETIVOS</b> .....	<b>7</b>
<b>CAPITULO II. ANTECEDENTES</b> .....	<b>17</b>
II.1 EL AGUA, PRINCIPAL MOTOR SOCIOECONÓMICO.....	17
II.2 RECURSOS HÍDRICOS NO CONVENCIONALES Y ESTRATEGIAS DE RIEGO .....	19
III.2.1 Recursos hídricos no convencionales ( Agua Regenerada).....	19
III.2.2 Diferentes usos del agua regenerada en la agricultura.....	24
III.2.3 Inconvenientes del agua regenerada para el riego agrícola .....	26
III.2.4 Estrategias de riego .....	30
II.3 CÍTRICOS .....	31
III.3.1 Origen y evolución de los cítricos.....	31
III.3.2 El cultivo de mandarina y pomelo .....	35
III.3.2.1 El pomelo.....	35
III.3.2.2 El mandarina.....	38
II.4 RELACIONES HÍDRICAS.....	42
III.4.1 Indicadores del estado hídrico de la planta .....	44
III.4.1.1 Conductancia estomática (g <sub>s</sub> ).....	44
III.4.1.2 Conductancia hidráulica (K) .....	46
III.4.1.3 K y g <sub>s</sub> frente a estreses abiótico y salino.....	47
III.4.1.4 Intercambio gaseoso y potencial hídrico.....	50
<b>CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>57</b>
III.1 CONDICIONES EXPERIMENTALES Y MATERIAL VEGETAL.....	57
III.2 CALIDAD DE AGUA Y TRATAMIENTOS DE RIEGO .....	59
III.3 ANÁLISIS DEL AGUA DE RIEGO.....	60
III.4 MEDIDAS DE LA PLANTA Y EL SUELO .....	63
III.4.1 Termometría Infrarroja .....	63
III.4.2 Medidas fisiológicas. Intercambio gaseoso y potencial hídrico .....	64
III.4.3 Medidas de suelo.....	66
III.5 MEDIDAS DE CALIDAD DE FRUTA .....	69
III.5.1 Medidas fisico-químicas.....	70
III.5.1.1 Calibre y peso .....	70
III.5.1.2 Firmeza .....	72
III.5.1.3 Sólidos solubles y acidez.....	73
III.5.1.4 Colorimetría .....	74
<b>CAPITULO IV. APARTADOS QUE COMPONEN LA TESIS DOCTORAL</b> .....	<b>77</b>

<b>APARTADO 1</b> “DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO POR TERMOMETRÍA INFRARROJA EN POMELOS REGADOS CON AGUA REGENERADA COMBINADO CON RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO”	79
Resumen.....	79
Introducción y objetivos .....	79
Materiales y métodos .....	83
Diseño experimental y análisis estadístico .....	86
Resultados y discusión.....	87
Conclusiones .....	112
<b>APARTADO 2</b> “ISOHIDRICIDAD DE DOS ESPECIES DIFERENTES DE CÍTRICOS BAJO CONDICIONES DE RIEGO DEFICITARIO Y AGUA REGENERADA”	115
Resumen.....	115
Introducción y objetivos .....	116
Materiales y métodos .....	118
Diseño experimental y análisis estadístico .....	121
Resultados y discusión.....	122
Conclusiones .....	140
<b>APARTADO 3</b> “EFECTOS A MEDIO-LARGO PLAZO DEL AGUA REGENERADA SALINA Y EL RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN LA CALIDAD DE LOS CÍTRICOS”	143
Resumen.....	143
Introducción y objetivos .....	144
Materiales y métodos .....	145
Diseño experimental y análisis estadístico .....	147
Resultados y discusión.....	148
Conclusiones .....	159
<b>APARTADO 4</b> “EFECTOS DEL AGUA REGENERADA SALINA Y LA ALTERNANCIA DE FUENTES DE AGUA EN LA CALIDAD DE FRUTO EN EL CULTIVO DEL MANDARINO A MEDIO-LARGO PLAZO”	161
Resumen.....	161
Introducción y objetivos .....	161
Materiales y métodos .....	162
Diseño experimental y análisis estadístico .....	164
Resultados y discusión.....	164
Conclusiones .....	183

<b>APARTADO 5 “EFECTOS DEL AGUA REGENERADA SALINA Y LA ALTERNANCIA DE FUENTES DE AGUA EN LA CALIDAD DE FRUTO EN EL CULTIVO DEL POMELO A MEDIO-LARGO PLAZO”</b> .....	<b>185</b>
Resumen.....	185
Introducción y objetivos .....	186
Materiales y métodos .....	186
Diseño experimental y análisis estadístico .....	188
Resultados y discusión .....	189
Conclusiones .....	205
<b>CAPITULO V. CONCLUSIONES</b> .....	<b>207</b>
<b>CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>215</b>
<b>CAPITULO VII. NOMENCLATURA</b> .....	<b>253</b>
<b>CAPITULO VIII. INDICE DE FIGURAS Y TABLAS</b> .....	<b>257</b>



# PREÁMBULO



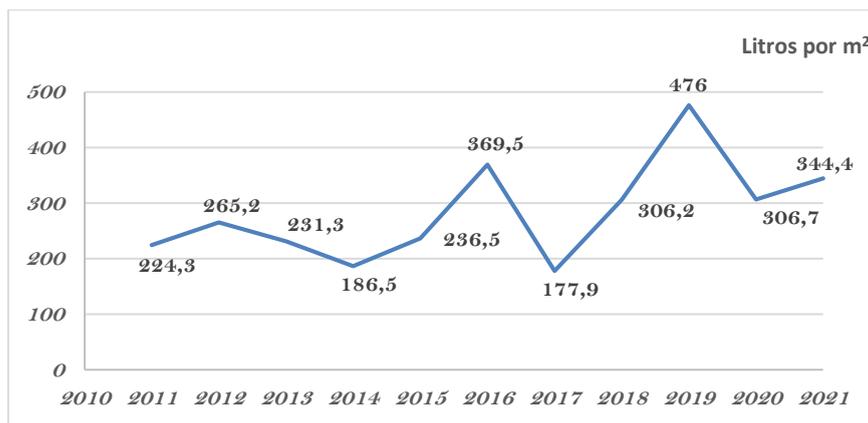


En el siglo XXI, el agua se sitúa a nivel mundial como uno de los recursos naturales más valiosos y cotizados para el desarrollo socio-económico de cualquier país o territorio, máxime en regiones donde los recursos hídricos escasean.

El aumento de población, junto con el cambio climático, está afectando directamente a los recursos hídricos de todo el mundo, incidiendo de forma importante en la demanda de alimentos, causando una mayor competencia por el agua y por el uso de la tierra. Se prevé un aumento del consumo de agua en torno a un 50% a nivel mundial para el año 2050, debido principalmente a la creciente demanda de producción de alimentos (ONU, 2022), incrementándose progresivamente la necesidad de producción de los mismos.

Dado que la agricultura es una de las actividades más importantes para el progreso, en las últimas décadas, la superficie mundial de regadío ha crecido significativamente a nivel global, pasando de 139 millones de hectáreas a 342 millones en la actualidad (FAO, 2021). Este incremento supone una sobreexplotación de los recursos hídricos, provocando una escasez de los mismos, traduciéndose en una mayor competencia por dichos recursos. Como consecuencia de ello, es probable que esta situación provoque una desaceleración del crecimiento económico, reduciéndose las tasas de crecimiento en hasta un 6% del PIB en 2050 (BMA, 2022).

La Región de Murcia, por sus características climáticas, presenta un desajuste estructural en sus recursos hídricos, siendo necesaria una gestión más óptima de los mismos. Enmarcada en el sureste español, la región presenta características de clima mediterráneo semiárido, donde los episodios de precipitaciones son mucho menores en comparación con el resto del territorio español. Dichas precipitaciones se encuentran mal repartidas tanto, en tiempo como en espacio, siendo la media anual en torno a (300–350 mm/año) (Figura P.1).



**Figura P.1. Precipitaciones Región de Murcia 2011-2021. Fuente: Propia**

Debido a la problemática expuesta anteriormente, las fuentes de agua no convencionales como las aguas regeneradas se encuentran en estos momentos en un auge progresivo, pasando a ser una parte importante en la agricultura y sostenibilidad del entorno rural. Actualmente, la región de Murcia posee 100 plantas depuradoras repartidas por todo su territorio, siendo el volumen de agua tratada de 121 (hm<sup>3</sup>/año), cifra que representa cerca del 10% de la demanda neta total de las UDA (Unidades de Demanda Agraria) de la demarcación hidrográfica del Segura (ESAMUR, 2023). Este tipo de aguas, presenta un perfil nutritivo muy beneficioso para los cultivos, fomentando el ahorro de fertilizantes y, en consecuencia, una posible disminución en la contaminación de acuíferos, si se hace una adecuada gestión de las mismas.

Aunque se estén introduciendo nuevas fuentes de agua en la agricultura, por sí solas no son suficientes para abarcar toda la demanda de agua requerida en la producción de alimentos. Para poder aprovechar aún más los recursos hídricos, aplicamos estrategias de riego como el RDC (Riego Deficitario Controlado), reduciendo los aportes de agua por debajo de las necesidades hídricas de la planta en ciertas etapas con baja sensibilidad al estrés, con el objetivo de ahorrar agua sin reducir significativamente la producción final ni la calidad de la cosecha.

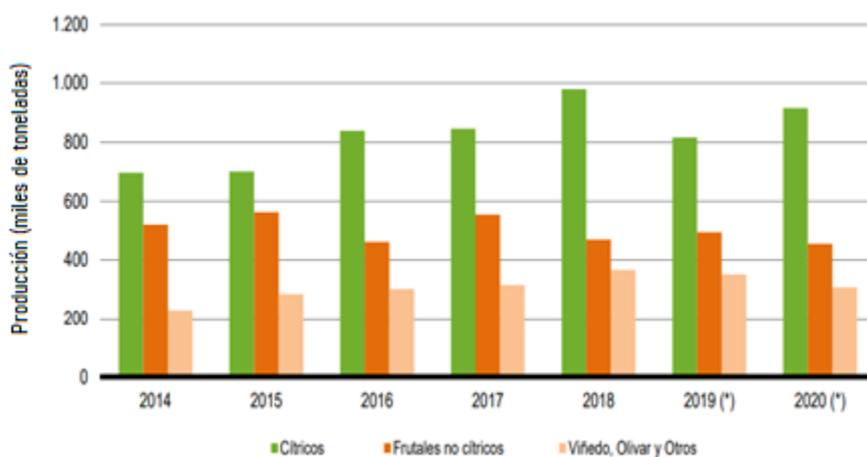
Con el fin, no solamente de ahorrar agua, sino de optimizar la gestión de los recursos hídricos, se utilizan indicadores del estado hídrico de la planta que permiten conocer la fisiología para aplicar agua en los momentos fenológicos

requeridos. Estos indicadores pueden ser discontinuos o continuos, según apliquemos unas técnicas u otras.

La combinación de aguas de distinta calidad, es otra manera de aplicar una estrategia de ahorro de agua importante, alternando la aplicación de las distintas fuentes de agua a lo largo del año sin que ello suponga un estrés hídrico para la planta.

La presente tesis pretende evaluar el manejo de dos fuentes de agua, una de ellas considerada de buena calidad proveniente del trasvase Tajo-Segura (AT) y otra fuente de agua procedente de la EDAR Molina norte (AR), considerada salina por su alto contenido en sales. Se pretende, no sólo ajustar los aportes de agua mediante estrategias de riego, sino aprovechar al máximo los recursos de agua disponibles, tanto convencionales, como no convencionales.

Los ensayos se han llevado a cabo en cítricos (*Citrus spp.* Rutaceae), por su gran importancia, ya que es de los cultivos más relevantes económicamente del área Mediterránea (Langgut, 2017). En la región de Murcia, se dedica la quinta parte (20,4%) de toda la superficie hortofrutícola a cítricos. La producción en toneladas (21,8%) es mayor que la de frutales no cítricos (13,6%) (Figura P.2). Contribuye con el 20,1% de la superficie, el 12,1% del volumen y el 10,9% del valor de la producción hortofrutícola nacional. (CARM, 2020).



**Figura P. 2. Producción de cultivos leñosos (miles de toneladas) 2014-2020. Fuente: CARM, 2020**



# **CAPITULO I.**

**RESUMEN**

**Y**

**OBJETIVOS**





Se estima que la población mundial aumente en 2.000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 7.700 millones actuales a los 9.700 millones en 2050, pudiendo llegar a un pico de cerca de 11.000 millones para 2100 (UN, 2020). Como consecuencia de ello, se espera que la demanda futura de productos agrícolas siga en aumento para el período 2015 a 2030 (FAO, 2020). Debido a esto, el agua se presenta como un factor limitante, dada su importancia en la producción agrícola (CE, 2017). Esa importancia aumenta exponencialmente en áreas de clima árido o semiárido, donde encontramos escasez de recursos hídricos, irregularidad espacial y temporal de las precipitaciones y competencia por el agua.

En este contexto, el uso de fuentes de agua alternativas como el agua regenerada y la aplicación de diferentes estrategias de riego, adopta un papel primordial en la sostenibilidad y desarrollo de la agricultura. El agua residual de industrias, establecimientos o domicilios puede ser tratada, separando la materia orgánica del agua (Arias et al., 2019). Dicha materia orgánica, es rica en nutrientes, los cuales, aportan efectos beneficiosos para los cultivos, reduciendo el aporte de fertilizantes de origen químico, dando lugar a grandes ahorros de los mismos y evitando la sobre explotación y contaminación de acuíferos (Laslo et al., 2012). Así, se toman nuevas medidas destinadas a reducir el riesgo de escasez de agua y se fomenta el uso de recursos alternativos que ayudarán en la adaptación a las consecuencias del cambio climático. Esta nueva forma de actuar, se enmarca dentro del concepto de economía circular, fomentada por la Unión Europea, para la mejora de la disponibilidad del agua y fomentar su utilización eficiente.

Por otro lado, la aplicación de diferentes estrategias de riego, como el RDC donde reducimos los aportes de agua en un período que no suponga una repercusión negativa para el cultivo, o la alternancia de aguas de distinta calidad agronómica como el agua de trasvase y depurada a lo largo del año, suponen un avance en el ahorro de agua en zonas de escasez, que a su vez también son las zonas de mayor demanda.

La Región de Murcia, ubicada dentro de los territorios agronómicos de clima semiárido posee la mayor cantidad de plantas depuradoras a nivel nacional. El 93% de esas plantas, produce un agua con una conductividad media por encima

de 2 dS/m y un 37% supera los 3 dS/m (ESAMUR, 2017). La alta salinidad en las aguas de riego, supone un factor de riesgo para la sostenibilidad de los cultivos y es responsable de pérdidas de producción en la agricultura. La salinidad también afecta a la producción de cítricos, considerados uno de las especies más sensibles a la misma (Al-Yassin, 2005) y a la acumulación de boro (B) (Grattan, 2015). La alta concentración de sales en la solución del suelo provoca un consumo extra de energía para poder absorber el agua del suelo. Como consecuencia de este estrés salino, reduce su desarrollo vegetativo y por consiguiente disminuye la producción.

En la tesis doctoral evaluaremos la respuesta agrofisiológica de los cítricos al riego (fisiología, producción y calidad de la cosecha) comparando el uso combinado de aguas no convencionales junto con aguas de buena calidad agronómica, frente a estrategias de riego como el RDC, donde se reducen las aportaciones de agua en diferentes períodos del cultivo y estrategias como ATc y ARc, donde sin restricciones de agua, alternamos las fuentes de agua a lo largo del año. En el tratamiento ATc, regamos durante todo el ciclo de cultivo con AT, excepto en el período estival, coincidiendo con la fase II, donde se riega con AR. El tratamiento ARc, se riega durante todo el ciclo de cultivo con AR, excepto en la fase II, de acumulación de azúcares en el fruto, donde regamos con AT.

En la presente tesis, también evaluaremos la idoneidad o aptitud de indicadores térmicos por termometría infrarroja (IRT) para determinar el estado hídrico de la planta utilizando diferentes estrategias de riego, y la isohidricidad de los mismos para tratar de entender su fisiología y así poder gestionar de manera óptima y eficiente el agua aportada.

Los objetivos principales de la tesis doctoral se dividen en 5 apartados:

En el primer apartado, evaluamos la idoneidad de los indicadores térmicos por termometría infrarroja (IRT) para determinar el estado hídrico de un cultivo en auge en la Región de Murcia, como es el cultivo del pomelo, en una finca comercial con riego localizado, utilizando agua regenerada (AR) y riego deficitario controlado (RDC) a largo plazo. Los resultados mostraron que las diferencias  $T_c - T_a$  ( $T^a$  dosel vegetal -  $T^a$  aire) fueron positivas en un amplio rango de déficits de



presión de vapor (DPV) y los mayores valores de ( $T_c - T_a$ ) se encontraron a las 10.00 GMT, antes y después de que se alcanzaran los valores más altos de DPV y radiación solar ( $R_s$ ). Además, evaluamos las relaciones entre  $T_c - T_a$  y el DPV para establecer las líneas de base sin estrés hídrico (NWSB), que son necesarias para calcular con precisión el índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI).

Se encontraron dos conclusiones importantes, que i) Las correlaciones más significativas ( $p < 0.005$ ) se hallaron a las 10.00 GMT y sus pendientes fueron positivas, y ii) Las NWSB mostraron una marcada variación horaria y estacional. La variación horaria fue principalmente debido al cambio de los valores de radiación solar, ya que tanto la pendiente de las NWSB como el intercepto de las NWSB estaban significativamente correlacionados con el ángulo solar cenital ( $\theta Z$ ) ( $p < 0.005$ ).

El intercepto fue mayor cuando  $\theta Z$  estaba cerca de 0 (al mediodía) y la pendiente mostraba una marcada histéresis a lo largo del día, aumentando por la mañana y disminuyendo por la tarde.

La determinación de las NWSB, según la estación del año mejoró la mayoría de sus coeficientes de correlación. Además, la relación significativa de  $T_c - T_a$  frente al DPV fue mayor en el periodo en el que el intercepto y  $T_c - T_a$  fueron bajos. El CWSI fue el indicador térmico que mostró el mayor nivel de acuerdo con el potencial hídrico del tallo de los diferentes tratamientos, aunque  $T_c$  y  $T_c - T_a$  también estuvieron significativamente correlacionados. Destacamos la idoneidad de los indicadores térmicos medidos por IRT para determinar el estado hídrico de pomelos en condiciones de salinidad (AR) y estrés hídrico (RDC).

En el segundo apartado, se evaluaron los efectos de los cambios diarios de la demanda evaporativa y el contenido de agua del suelo sobre la fisiología de los cultivos de pomelo y mandarino regados con agua regenerada (AR) y agua procedente del trasvase Tajo-Segura (AT) combinadas con dos estrategias, una consistente en un riego completo (CT) y otra sin riego (nI). Las respuestas fisiológicas fueron diferentes según la especie.

El pomelo mostró un patrón isohídrico que restringió el uso del potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_1$ ) como indicador del estado hídrico de la planta. Su estado hídrico se vio afectado por la salinidad (AR) y el estrés hídrico (nI), principalmente con la combinación de ambos (AR-nI); sin embargo, el mandarino resultó ser relativamente más tolerante a la salinidad y más sensible al estrés hídrico, principalmente por sus bajos niveles de conductancia hidráulica (K), mostrando una caída crítica en  $\Psi_1$  que condujo a severas pérdidas de la conductancia hidráulica de la raíz ( $K_{raiz}$ ) y del dosel ( $K_{dosel}$ ) en AT-nI. Este comportamiento no se observó en AR-nI debido a una reducción del volumen del dosel vegetal como característica adaptativa. Así, el mandarino mostró un comportamiento más anisohídrico en comparación con el pomelo, pero isohidrodinámico ya que su gradiente de potencial hídrico hidrodinámico de las raíces a los brotes ( $\Delta\Psi_{planta}$ ) fue relativamente constante a través de variaciones en la conductancia estomática ( $g_s$ ) y el potencial hídrico del suelo.

La  $g_s$  se consideró un buen indicador del estado hídrico de la planta en ambas especies, y sus respuestas al aumento diario del DPV y a la sequía del suelo estuvieron fuertemente correlacionadas con el tallo de  $K_{raiz}$ . El ABA no mostró ningún efecto sobre la regulación estomática, destacando el papel fundamental de la hidráulica de la planta en el cierre estomático.

En el tercer apartado evaluamos la viabilidad del uso de fuentes de agua no convencionales como el agua regenerada (AR) junto con técnicas de ahorro de agua como el RDC en los cultivos de mandarino y pomelo. Para su evaluación, comparamos el riego a largo plazo con dos fuentes, el agua de trasvase (AT) y el agua regenerada (AR), combinados con dos estrategias de riego, al 100% de las necesidades hídricas del cultivo (CT) y riego deficitario controlado (RDC), regados al 50% de las necesidades hídricas del cultivo en la fase II de crecimiento del fruto.

Para la realización del ensayo se llevó a cabo el estudio de la calidad del fruto de mandarinas y pomelos durante ocho años, controlando los parámetros físico-químicos más relevantes en la comercialización, como son el peso del fruto (PF), espesor de corteza (EC), contenido en sólidos solubles (CSS), acidez ( $A_T$ ) e índice de madurez (IM). También se hizo un seguimiento de calidad de agua de riego procedente de ambas fuentes, destacando parámetros físicos tan importantes



como la conductividad eléctrica (CE), pH y químicos como  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{+}$ ;  $\text{K}^{+}$ ;  $\text{Na}^{+}$ ; B; Cl<sup>-</sup>;  $\text{NO}_3^-$ ;  $\text{PO}_4^{3-}$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Se observaron varios aspectos positivos con respecto al mandarino: i) El riego con AR dio lugar a una tendencia al aumento del peso del fruto con respecto a AT desde el inicio del ensayo, aunque dichas diferencias no fueron significativas en 2012, 2013 y 2014 debido a una disminución del espesor de la corteza; ii) Los tratamientos RDC (AR o AT) aumentaron CSS y  $A_T$  en el periodo más largo. Por otra parte, se observó un aspecto negativo: AR se asoció a una reducción del IM debido a que  $A_T$  aumentó en mayor medida que CSS. No obstante, la fruta de este tratamiento cumplió las normas de calidad de calidad propuestas por la CEPE (Comisión Económica para Europa de la Naciones Unidas) durante los 8 años que duró el ensayo. En cuanto al pomelo, destacamos tres aspectos: i) Una tendencia al aumento de CSS que se traduce en una mejora de IM en los tratamientos RDC, aunque dichas diferencias fueron significativas en años alternos: 2010, 2012 y 2014; ii) Ni RDC ni AR aumentaron la acidez del fruto; iii) Hubo una disminución significativa del EC en los últimos 2 años. Como conclusión, podemos demostrar la viabilidad a medio y largo plazo del uso de AR y RDC para regar cítricos. Sin embargo, deben realizarse con precaución y con un manejo adecuado para evitar dañar la calidad de la fruta como resultado de elementos fitotóxicos.

En el cuarto apartado, se pretende estudiar la viabilidad del uso de AR en cítricos a medio largo plazo, concretamente en mandarino, junto con la aplicación de estrategias de alternancia de aguas de distinta calidad agronómica, con el objetivo de evaluar si es rentable y sostenible regar con un recurso hídrico no convencional durante el periodo estival, en el que AT es de muy difícil disponibilidad. Para ello, se dispuso de una fuente de agua considerada de buena calidad agronómica, como el agua procedente del trasvase Tajo-Segura (AT), con una conductividad eléctrica (CE) en torno a 1 dS/m y agua procedente de la EDAR Molina Norte (AR) con una CE en torno a 3-3,5 dS/m. Se ha llevado a cabo un seguimiento de los parámetros de calidad de agua ( $\text{CE}_a$  y  $\text{RAS}_a$ ), parámetros del suelo que puedan afectar directamente al desarrollo fisiológico de la planta ( $\text{CE}_s$ ,  $\text{RAS}_s$  y  $\text{CROSS}_s$ ), parámetros del estado hídrico de la planta ( $\Psi_t$ ,  $A$ ,  $g_s$ ), así como parámetros de producción y calidad de cosecha.

Dado que el uso de AR afecta tanto a nivel de planta, como al de producción y calidad de la cosecha (Nicolas et al 2016; Nicolas et al., 2017; Romero-Trigueros et al., 2019), en este trabajo, se pretende demostrar los posibles beneficios derivados del uso prolongado de AR, combinado con estrategias como la alternancia de ambas fuentes de agua, de manera que, no influya negativamente en la fisiología de la planta, ni tampoco en la producción y la calidad de cosecha.

Se observaron aspectos positivos en la aplicación a largo plazo de este tipo de estrategias en el cultivo del mandarino: i) En los tratamientos de alternancia de aguas (AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub>) se encontró un incremento del volumen del dosel vegetal, especialmente en AR<sub>c</sub>, dando lugar a un aumento de la cosecha y, por lo tanto, una mayor carga de frutos en el árbol sin verse afectado el peso de los mismos. ii) La aplicación de AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> dio lugar a una mayor productividad del agua de riego a largo plazo. iii) La calidad del fruto se vio afectada de manera positiva, con un ligero aumento del contenido en zumo y azúcares, en comparación con el tratamiento control AT. iv) La alternancia de aguas, no produjo una acumulación de elementos fitotóxicos en hoja, incrementando en septiembre el intercambio gaseoso (A y g<sub>s</sub>).

Sin embargo, cuando se aplicó únicamente agua salina AR, se encontraron aspectos negativos en este tipo de aguas: i) El riego prolongado con AR aumentó considerablemente los valores de RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, influyendo directamente en la calidad del suelo (estructura del suelo). ii) Disminuyó el tamaño del dosel vegetal, la carga del fruto y la producción, afectando a la productividad del agua de riego. iii) La aplicación prolongada de agua salina influyó negativamente en los frutos, con un menor peso de los mismos en comparación con el tratamiento AT. iv) El uso prolongado de AR, produjo una acumulación de elementos fitotóxicos en hoja, influyendo en la fisiología de la planta y disminuyendo el intercambio gaseoso (A y g<sub>s</sub>). Aunque la aplicación prolongada de AR afectó negativamente, sin embargo, el menor tamaño de frutos obtenidos con el riego con AR, provocó un mayor CSS y un menor EC.

En el quinto apartado, estudiamos la viabilidad del uso de AR salina, caracterizada por una alta concentración de sales solubles, en cítricos a medio-



largo plazo, concretamente en pomelo, injertado sobre patrón Macrofila (“Citrus Macrophylla”), caracterizado por su resistencia a la salinidad (Pedrero et al., 2015). Para ello, se dispuso de una fuente de agua considerada de buena calidad agronómica como es el agua procedente del trasvase Tajo-Segura (AT), con una conductividad eléctrica (CE) en torno a 1 dS/m y agua procedente de la EDAR Molina Norte (AR) con una CE  $\approx$  3-3,5 dS/m. Se ha llevado a cabo un seguimiento de los parámetros de calidad de agua (CE<sub>a</sub> y RAS<sub>a</sub>), parámetros del suelo que puedan afectar directamente al desarrollo fisiológico de la planta (CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>), parámetros de intercambio gaseoso (A, g<sub>s</sub>), elementos fitotóxicos a nivel foliar, así como parámetros de producción y calidad de cosecha.

Dada la alta demanda de recursos hídricos en la agricultura, se pretende introducir nuevas estrategias de riego como la alternancia de aguas de distinta calidad agronómica, con el objetivo de evaluar la rentabilidad y sostenibilidad del riego con un RHNC como el AR durante el periodo de mayor exigencia hídrica para los cultivos, como es el estival. A su vez, queremos demostrar los posibles beneficios derivados del uso prolongado de AR, combinado con este tipo de estrategias, de manera que, no influya negativamente en la fisiología de la planta, ni tampoco en la producción y la calidad de cosecha.

Se observaron aspectos positivos a largo plazo en este tipo de estrategias:

- i) La alternancia de agua no afecta de manera negativa en el tamaño del dosel vegetal, equiparándose al tratamiento control y consiguiendo un ahorro considerable de AT. Para todo el periodo del ensayo (2013-2018), en el tratamiento AT<sub>c</sub>, se produjo un ahorro del 39% de AT y un 61% para el tratamiento AR<sub>c</sub>.
- ii) Aunque el riego prolongado con AR afectó negativamente al dosel vegetal, no lo hizo en la producción total del mismo, dando lugar a una mayor productividad del agua.
- iii) Para el tratamiento AR<sub>c</sub>, la calidad de fruto se vio afectada de manera positiva, incrementándose un 11% el CSS.
- iv) La alternancia de fuentes de agua no produce una acumulación de elementos fitotóxicos en hoja, incrementando en septiembre A y g<sub>s</sub>.

Sin embargo, también se encontraron aspectos negativos en este tipo de estrategias: i) El riego prolongado con AR aumentó considerablemente los valores

de RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, influyendo negativamente en la estructura del suelo; ii) El AR disminuyó el tamaño del dosel vegetal, la carga del frutos y la producción, comparado con AT; iii) La alternancia de agua, afectó de manera negativa, aunque no significativa en la producción y carga de fruto, disminuyendo la productividad del agua en comparación con AT; iv) El uso prolongado de AR provocó estrés salino, dando como consecuencia una acumulación elementos fitotóxicos en la hoja, disminuyendo los niveles de A y g<sub>s</sub>.

# **CAPÍTULO II.**

## **ANTECEDENTES**



## II.1 El agua, principal motor socioeconómico

El agua es el núcleo del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socio-económico, la energía, la producción de alimentos, los ecosistemas y para la supervivencia de los seres humanos. El consumo de agua se ha multiplicado por seis en el último siglo y crece a un ritmo de un 1% anual (UNESCO, 2021). El cambio climático se manifiesta en el aumento de la frecuencia de fenómenos extremos tales como las tormentas, las inundaciones y sequías o las olas de calor que agravarán la situación de los países que actualmente sufren 'estrés hídrico'.

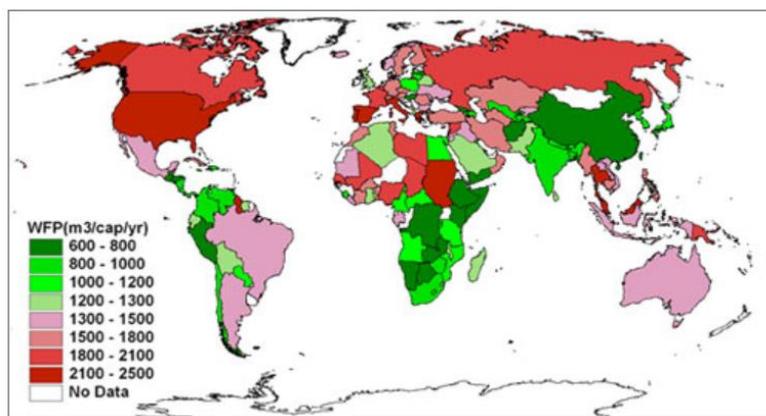


Figura II. 1 Consumo de agua a nivel mundial. Fuente: WaterFootprint, 2020

A medida que crece la población mundial se genera una necesidad creciente de los recursos hídricos para que la población tenga lo suficiente para satisfacer sus necesidades (Figura II.1). Es por ello, que la regeneración de aguas se ve como una medida indispensable hoy día. El 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas (UNESCO, 2017) y, a su vez, la agricultura representa el 70% de la extracción mundial de agua (FAO, 2020). La mala gestión del agua tiende a exacerbar los impactos del cambio climático, no sólo de los recursos hídricos, sino de la sociedad en su conjunto. Para realizar una gestión óptima de dichos recursos, se debe invertir en técnicas de tratamiento modernas, y

al mismo tiempo, optimizar al máximo el agua disponible ya que los recursos hídricos se encuentran bajo presión en la mayoría de los países.

La población mundial crece con rapidez, y al ritmo actual, el mundo se podría enfrentar a un déficit del 40% entre la demanda prevista y el agua disponible en 2030 (UNESCO, 2020). Para alimentar a 9000 millones de personas en 2050 será necesario que la producción agrícola aumente en un 60 % y la extracción de agua en un 15% (ONU, 2017).

España es un país con diferentes situaciones geográficas y climas dentro de un mismo territorio, las cuales condicionan la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos. Dentro del territorio español, encontramos zonas con abundantes recursos hídricos, como el norte y noroeste, y zonas de escasez de agua como el sur y el este. La zona mediterránea está constituida por las cuencas pequeñas que vierten al mar, con pluviometrías insuficientes para satisfacer la demanda de la agricultura. Uno de los factores más destacados es la acusada irregularidad de sus precipitaciones con periodos largos de sequía y acontecimientos de lluvias torrenciales. Las precipitaciones por sí mismas no son capaces de compensar la amplia demanda de agua a lo largo del año, que, junto con su irregularidad, hace más necesario que nunca adoptar nuevas medidas.

A su vez, el regadío es el principal uso del agua en España, con una demanda hídrica superior a los 24.000 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa casi el 80% del total. Estos recursos abastecen a una superficie de 3,4 millones de ha, que suponen casi el 18% de la superficie total cultivada (CH.SEGURA, 2021).

La Cuenca del Segura se encuentra, desde hace años, en una situación de déficit hídrico, con consumos superiores a los recursos disponibles. Actualmente, la Región de Murcia representa el 58,8 % de la demarcación hidrográfica del Segura. Existe un déficit estructural de la cuenca, en cuyo territorio hay una amplia dependencia del sector agrario. La planificación hidrológica se realiza a través de los Planes Hidrológicos. Los recursos máximos trasvasables en un año son 540 hm<sup>3</sup>, mientras que la aportación media recibida por la Cuenca del Segura es de 305 hm<sup>3</sup>. De las aportaciones recibidas, el 67,2% corresponde a consumos agrarios. Sin



embargo, en los últimos años se han reducido mucho las aportaciones y el consumo en la cuenca ha llegado a ser de 125,9 hm<sup>3</sup> en 2019 (CH.SEGURA, 2021). Ante tal situación, tanto la desalinización como la reutilización de aguas se ven indispensables. Con el objetivo de conseguir una estabilización de la superficie de regadío sin sobre-explotar o agotar los recursos naturales, los recursos alternativos como las aguas regeneradas son una fuente de agua que debemos de tener muy en cuenta. Todo ello junto con la aplicación de nuevas estrategias y el empleo de nuevas tecnologías, como la utilización de sensores que nos aporten información del estado hídrico de los cultivos, supondrá un nuevo avance para la sostenibilidad del regadío.

## **II.2 Recursos hídricos no convencionales y estrategias de riego**

### **II.2.1 Recursos hídricos no convencionales (Agua Regenerada)**

Ante lo expuesto anteriormente, la depuración de aguas para su posterior reutilización es un elemento esencial para el ciclo natural del agua y una de las grandes estrategias para luchar contra la escasez de la misma. Las aguas residuales ya no se ven como un desecho que hay que eliminar, sino como un recurso. El potencial de la reutilización del agua en nuestro país es elevado. En el último informe de seguimiento de los planes hidrológicos de cuenca y de los recursos hídricos en España (MITECO, 2021), se estima que el volumen de suministro de agua reutilizada en el año 2020/2021, fue de 400 hm<sup>3</sup>.

Las aguas regeneradas pueden reutilizarse para diferentes fines como la agricultura, evitando así la presión que ésta ejerce sobre las fuentes de agua dulce. Por tanto, las estrategias de reutilización de aguas regeneradas en agricultura deben de ser fundamental para la evolución y el futuro de los cultivos. Este tipo de aguas pueden usarse de manera segura para la producción agrícola, pero hacerlo requiere una gestión de los riesgos sanitarios, un tratamiento adecuado y una intervención de las autoridades bien orientada. La reutilización del agua en condiciones seguras es fundamental para mitigar su escasez y supone el paradigma del concepto de economía circular impulsado por la Unión Europea basado en dar una nueva

vida a lo usado reconvirtiéndolo en una fuente de recurso. Por lo tanto, mejorar las estrategias para la gestión de este bien se antoja fundamental contra la falta de agua.

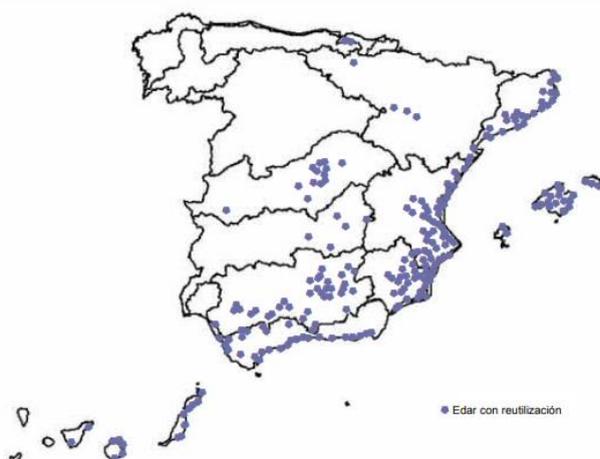
A nivel europeo, la reutilización del agua se identifica y fomenta en las disposiciones de dos importantes marcos normativos, la directiva marco del agua y la directiva sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas. En 2020 se publicó una norma específica para la reutilización de las aguas residuales urbanas en la agricultura “EL REGLAMENTO (UE) 2020/741 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO”. La elaboración de esta norma europea parte de los compromisos de la Comisión para promover la reutilización de las aguas residuales tratadas, dentro de su plan de acción para la economía circular, y tiene la finalidad de “garantizar que las aguas regeneradas sean seguras para su uso previsto y de esta forma asegurar un alto nivel de protección de la salud humana y animal y del medio ambiente, hacer frente a la escasez de agua y la correspondiente presión sobre los recursos hídricos de manera coordinada en toda la Unión, contribuyendo además al funcionamiento eficaz del mercado interior” (MITECO, 2021). Esta nueva legislación nos da a entender el papel fundamental que adquiere la reutilización de aguas tanto para presente como para futuro, donde se prevé un crecimiento tal, que supere al de agua desalada. Este reglamento entró en vigor veinte días desde su publicación en el Diario Oficial de la Unión Europea, es decir, el 25 de junio de 2020, y es aplicable a partir del 26 de junio de 2023.

Uno de los ejes para mejorar la gestión de los recursos hídricos europeos y prevenir la escasez de agua culminó con la aprobación definitiva por parte del Parlamento Europeo de las nuevas reglas sobre reutilización del agua. Europa podría reutilizar hasta 6.600 millones de metros cúbicos de agua en 2025, seis veces más que actualmente, gracias a la aprobación de la nueva normativa que amplía los usos de estas aguas regeneradas (Feragua, 2020). El objetivo es garantizar un uso más amplio de las aguas residuales tratadas para limitar el recurso tanto a las masas de agua, como a las aguas subterráneas. La reducción de las aguas subterráneas, en particular debido al regadío en la agricultura, pero también por el uso industrial y el desarrollo urbano, es una de las mayores amenazas para los recursos hídricos de la UE. En resumen, la reutilización del agua ha adquirido un

gran desarrollo y amplia aceptación para usos no potables desde la década de los 80, ya que ofrece recursos locales de calidad, autosuficientes y fiables (Europarl, 2020).

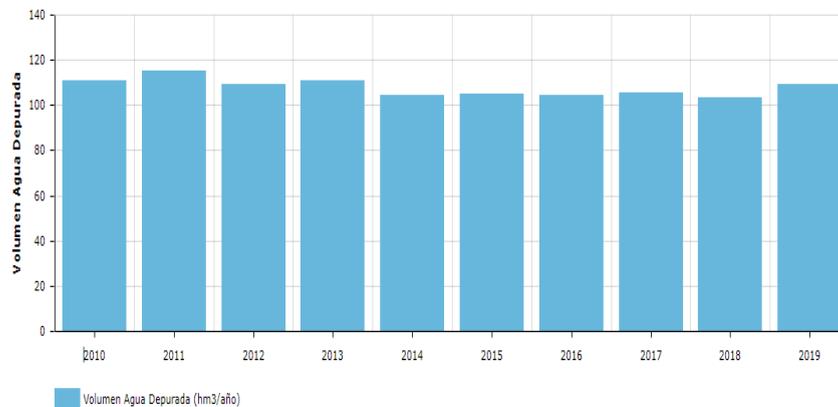
España es el líder europeo en reutilización de agua, dado que es el país que más volumen de agua reutilizada produce, y ocupa la quinta posición a nivel mundial en cuanto a capacidad de reutilización instalada. El 27% de las más de 2.000 estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) de nuestro país están preparadas tecnológicamente para ofrecer los tratamientos terciarios que posibilitan la reutilización del agua y se estima que ya reutilizamos más de 400 hm<sup>3</sup> al año, entre el 7 y el 13% del agua residual tratada (Iagua, 2021).

La diversidad que caracteriza a las diferentes regiones de España, también es evidente desde una perspectiva hídrica, lo que explica que el uso de la reutilización dentro de nuestro país varíe enormemente y se concentre mayoritariamente en zonas donde el estrés hídrico es más pronunciado. El 90% del total de agua reutilizada se concentra en el Levante y Andalucía (Figura II.2). Murcia es la que lo hace en un mayor porcentaje, llegando a alcanzar el 90% del agua residual tratada (AEDyR, 2020) (Figura II.3).



**Figura II. 2** Ubicación geográfica de Estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR).  
Fuente: CEDEX, 2018

El 56% del volumen tratado es reutilizado directamente, mientras que del 39% restante, un 36,1% corresponde a la reutilización indirecta (riego de campos de golf...etc) y usos municipales (riego de zonas verdes, limpieza de calles...etc) y, de manera más minoritaria, para usos industriales (CH.SEGURA, 2021). También es destacable, el cada vez mayor interés que despierta su uso para la mejora ambiental de otras fuentes de agua como, por ejemplo, la recarga de acuíferos, humedales o mejora de los caudales ecológicos de los ríos.



**Figura II. 3** Histórico volumen agua depurada en la Región de Murcia ( $\text{h}^3/\text{año}$ ). Fuente: ESAMUR (2022).

Para el horizonte 2033, la estimación de la demanda urbana para abastecimiento alcanzará los  $211 \text{ hm}^3/\text{año}$ , estimando un volumen de agua residual tratada por EDARs de  $166 \text{ hm}^3/\text{año}$  (80% del volumen suministrado). De este volumen se reutilizarían de forma directa  $107 \text{ hm}^3/\text{año}^{-1}$  (un 64%). El volumen de reutilización indirecta tras su paso por el Dominio Público Hidráulico sería de  $57 \text{ hm}^3/\text{año}$  (35%), siendo el volumen vertido al mar, no reutilizado, de  $2 \text{ hm}^3/\text{año}$  (1%) (MITECO, 2021).

La Región de Murcia ha cumplido con los objetivos y plazos marcados por la Directiva 91/271/CEE, y se plantea incrementar notablemente el grado de exigencia de la misma, ampliando el rango de alcance hasta aglomeraciones

urbanas de pequeño tamaño. Para ello se ha desarrollado un segundo plan de saneamiento y depuración de la Región de Murcia, con horizonte 2030. Entre los objetivos del nuevo plan, podemos destacar la mejora cualitativa del estado de las masas de agua, en especial del Mar Menor y las aguas costeras del Mar Mediterráneo, el aumento de la disponibilidad de agua tratada para otros usos y el impulso I+D+i en el ámbito del saneamiento y depuración, contribuyendo al liderazgo de la Región de Murcia.

La agricultura en la Región de Murcia ha sido de gran importancia socio-económica a lo largo de la historia, ello se evidencia con el aprovechamiento agrícola de 31% de la superficie total de la Región (CARM, 2020) (Figura II.4). El volumen total depurado por las estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs) gestionadas y controladas por la Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (ESAMUR), ha superado los 109 hm<sup>3</sup> (ESAMUR, 2020), cifra que representa cerca del 10% de la demanda neta total de las UDA de la demarcación hidrográfica del Segura. Es de destacar que únicamente se vierte al mar los volúmenes que no es posible su reutilización por motivos técnicos o de viabilidad económica.

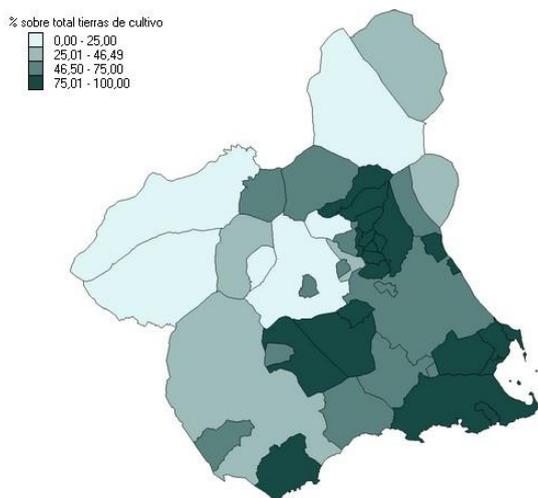


Figura II. 4 Distribución de la superficie de cultivo de regadío. Fuente: CARM, 2020

## II.2.2 Diferentes usos del agua regenerada en la agricultura

Actualmente, además del uso de AR para riego en el sector agrícola, el aprovechamiento de los nutrientes procedentes de la depuración se hace cada vez más común, suponiendo un ahorro en unidades de fertilización y como consecuencia, un ahorro económico. El potasio y el nitrógeno son los principales nutrientes empleados como fertilizantes y los más presentes en aguas residuales.

El fósforo es otro de los nutrientes presente en las aguas residuales, susceptible de recuperación. Se considera al fósforo como un recurso no renovable que se obtiene de las minas de roca fosfórica, y cuyo agotamiento se estima en torno a 200 años (Ohtake et al., 2019). Debido al riesgo de eutrofización que entraña, el vertido incontrolado de fósforo se encuentra cada vez más restringido desde el punto de vista legislativo.

La recuperación de fósforo se realiza en forma de estruvita (Figura II.5), llevándose a cabo, principalmente, sobre la fracción líquida resultante tras la digestión anaerobia de los lodos, debido a la concentración en grandes cantidades de  $P-PO_4^{3-}$  así como de  $N-NH_4^+$  generados por los microorganismos. El 90% del fósforo que entra en las EDAR sale en la línea de lodos, puesto que, en el tratamiento primario, uno de los objetivos es precipitarlo junto con coagulantes metálicos para retirarlo de la línea de aguas (Butosov, M et al., 2013). El sólido presente en el lodo concentra casi 20 veces más de fósforo que la fracción líquida que lo acompaña. Es por ello que resulta de gran interés la recuperación de fósforo de todo el lodo y no sólo de la fracción líquida, tal como se lleva a cabo actualmente de forma generalizada.

Aunque la estruvita pura teórica contiene únicamente amonio, fósforo y magnesio, en la realidad se obtienen cristales con trazas de cromo, níquel y plomo que varían en función del proceso empleado, obteniéndose un cristal de entre 90-98% de pureza. A su vez, se obtienen cristales cuyo contenido en agua es menor al 5%, (Iagua, 2014). Estas buenas características nutricionales la hacen óptima para uso como fertilizante.



*Figura II. 5 Fertilizantes de Estruvita a partir de materias primas secundarias. Fuente: Nutriman.net*

Los lodos deshidratados provenientes de las estaciones de depuración, aportan múltiples beneficios, mejorando las fitopropiedades del suelo, aportando N-P-K, además de humedad y materia orgánica. Su aplicación, asegura un incremento de la capacidad de adsorción e inmovilización parcial de los componentes del suelo, favoreciendo la asimilación de los nutrientes, incrementando la retención de agua, mejorando el enraizamiento y evitando la degradación del mismo, mejorando la textura.

Otro beneficio a tener en cuenta del uso de agua regenerada en la agricultura es la conservación del agua dulce para otros usos, a la vez que potenciamos el contenido de los nutrientes como abono y reducimos de la descarga de las mismas a medios acuáticos ecológicamente sensibles. Las AR constituyen una nueva fuente de suministro de agua permanente, que, con los sistemas actuales de saneamiento, permiten proporcionar agua de mejor calidad y destinarla a diversos usos fuera del ámbito de la agrícola.

### III.2.3 Inconvenientes del Agua Regenerada para el riego agrícola

El riego con AR es generalmente seguro y su uso debe ser promocionado a fin de conservar los recursos hídricos convencionales. Los posibles riesgos dependen de varios factores, entre los que se incluyen la calidad del agua, las características de suelo, planta y las técnicas de riego empleadas. Estos riesgos pueden ser controlados mediante unas adecuadas prácticas de riego y gestión de los tipos de cultivo.

El agua regenerada se debe aplicar de forma diferente al agua potable, teniendo en cuenta diversos factores para evitar posibles problemas. El principal factor a tener en cuenta con el riego con agua regenerada en la agricultura y en zonas urbanas se centra principalmente en el riesgo por salinización de suelos y cultivo, la acumulación de metales tóxicos en el suelo y la posterior transferencia de la planta, contaminación del agua subterránea por sales, contaminantes emergentes y problemas de salud pública debido a patógenos.

En general, el riego con AR puede llevar al suelo a altos niveles de concentración de sales, degradándolo, provocando la pérdida de textura y la falta de asimilación de nutrientes por la planta. La acumulación de sales en suelo puede deberse a varios factores que incluyen la calidad del agua regenerada, las prácticas de riego, las propiedades del suelo y la tolerancia a la salinidad del cultivo, como se ha citado anteriormente. Como consecuencia, aumentará el deterioro de las propiedades del suelo, al contener altas proporciones de  $\text{Na}^+$  en relación al  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , denominado relación de adsorción de sodio (RAS), causando problemas de infiltración y permeabilidad de los suelos. Además, los dos elementos que contribuyen a la salinidad de forma principal,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , pueden ser tóxicos para algunas plantas especialmente sensibles (Navarro et al., 2020).

Respecto a la idoneidad agronómica de este tipo de aguas, una de las guías más completas es la de Ayers y Westcot (Estudio FAO, riegos y drenajes), dónde se evalúa la calidad de las aguas de riego. En ella podemos ver cómo las aguas regeneradas pueden presentar altos niveles de sal y altas concentraciones de iones fitotóxicos. Por ello es muy importante un seguimiento de su calidad, mediante el control de los siguientes parámetros:



- pH. Puede alterar el equilibrio del suelo, afectando a la asimilación de nutrientes.
- Sólidos en suspensión. Puede provocar obturación en los sistemas de riego localizado.
- Exceso de salinidad. Conforme aumenta la conductividad eléctrica del agua (CE) disminuye el rendimiento de los cultivos. Valores por debajo de  $1 \text{ dSm}^{-1}$  no producen efectos perjudiciales en las producciones de los cultivos; y valores entre  $1$  y  $2 \text{ dSm}^{-1}$  pueden producir reducciones de la producción, aunque muy poco significativas. A partir de  $3 \text{ dSm}^{-1}$  se consideran aguas no recomendables para riego. Además, se puede provocar la salinización del suelo agrícola.
- Toxicidad por iones, cuando su concentración supera el nivel de tolerancia se manifiestan los síntomas de toxicidad y la disminución del rendimiento de los cultivos:
  - **Cloruro**, se considera como límite de tolerancia a este ion  $0,5 \text{ g/l}$ , este valor sólo es orientativo pues la manifestación de toxicidades concretas dependerá de las condiciones particulares en cada caso;
  - **Sodio**, concentraciones superiores a  $0,2 - 0,3 \text{ g/l}$  en agua de riego pueden dar lugar a la aparición de los síntomas de toxicidad, también puede provocar la degradación del suelo;
  - **Boro**, entre los cultivos más sensibles a esta toxicidad se encuentran los cítricos que puede manifestarla con concentraciones superiores a  $0,5 \text{ mg/l}$  (Figura II.6);

Por otro lado, debido a la gran cantidad de nutrientes, en especial P que contienen las AR, cuando estas son almacenadas en balsas, sobre todo en comunidades de regantes, junto con unas condiciones climáticas concretas, provocan el crecimiento y desarrollo de algas que pueden ocasionar problemas en el sistema de filtrado y en el riego localizado (obturaciones de emisores), que afectan principalmente a la uniformidad de aplicación de agua de riego en parcela, lo cual conduce a variaciones en el crecimiento y reducciones en la productividad

del cultivo. Todos estos inconvenientes, gestionando las aguas regeneradas de forma adecuada, no deberían ocasionar problemas significativos para su uso agrícola. Para ello, el buen manejo de los recursos junto con unas adecuadas estrategias de riego, confieren a este tipo de aguas un valor muy importante ya no en el futuro, si no en el presente más inmediato.



**Figura II. 6 Efectos toxicidad de boro en cítricos: A (Limonero); B (Naranja); C (Pomelo).  
Fuente: Agrosal.es**

Las sales afectan el metabolismo de la planta mediante un efecto de los iones que causa desequilibrios en la absorción de nutrientes y acumula gradualmente niveles tóxicos de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  en las partes aéreas (Al-Yassin, 2005) (figura II.7). En cítricos, han sido descritas, aunque no siempre ocurren simultáneamente dado que algunas son dependientes del portainjerto (García-Tejero et al., 2010); es decir, el patrón donde se injerta la variedad es el que va a determinar la tolerancia o sensibilidad a los diferentes estreses abióticos, incluida la salinidad y la sequía (Syvertsen y Levy, 2005; Navarro et al., 2011; Gimeno et al., 2012). Los efectos fisiológicos del estrés salino en los cítricos incluyen, entre otros, una reducción de la conductancia estomática (García-Sánchez et al., 2007), de la tasa de transpiración de la hoja y de la asimilación neta de  $\text{CO}_2$  (García-Sánchez y Syvertsen, 2006). En los cítricos, el efecto negativo de elevados niveles de sales y de B en la producción y crecimiento de los mismos (contribuyendo al amarilleo y defoliación de los árboles), se debe a que normalmente, en vez de inducir ajustes osmóticos (Levy y Syvertsen, 2004), estos elementos se acumulan gradualmente hasta niveles tóxicos en la zona de la raíz (Melgar et al., 2008, 2009) o en los tejidos foliares (Romero-Trigueros et al., 2014).



*Figura II. 7 Acumulación de sales en la zona del bulbo húmedo. Fuente: Agrosal.es*

En la Región de Murcia, se han llevado a cabo estudios sobre el efecto del uso de las aguas regeneradas en cítricos, como mandarino y pomelo, demostrando que el riego a largo plazo tiende a acumular sales dentro de la zona radicular y a nivel foliar, pudiendo causar problemas de salinidad y acumulación de B en plantas y suelos a largo plazo (Romero-Trigueros et al., 2014a).

Otros estudios también sugieren que el B y la salinidad pueden limitar la posibilidad de usar éste tipo de aguas para el riego de cítricos (Renboll et al., 2000; Pedrero y Alarcón, 2009; Mounzer et al., 2013; Pedrero et al., 2013; 2014; 2015; Romero-Trigueros et al., 2014a; Grattan et al., 2013, 2015; Nicolás et al., 2016). Para garantizar la sostenibilidad del uso de estos recursos no convencionales en la agricultura hay que llevar a cabo una adecuada monitorización de las sales en el suelo para evitar la posible reducción de las propiedades agronómicas del mismo y buenas prácticas de manejo riego (Pedrero et al., 2015).

Por otro lado, los ensayos sobre los efectos de aguas regeneradas sobre la calidad de la fruta en los cítricos son escasos y la mayor parte proviene de experimentos en los que la sal no pertenece directamente a la fuente de agua (Levy et al., 1978, 1979; Boman 2000, 2001; Pérez-Pérez et al., 2015). Es por ello que la presente tesis centra gran parte de su contenido a la evaluación de la calidad de la

fruta en pomelo y mandarino regados con agua regenerada durante períodos de tiempo relativamente largos en comparación con otros estudios.

#### **II.2.4 Estrategias de riego**

El cultivo en zonas con escasez de agua resulta un desafío para la agricultura. Resolver la falta de agua de manera eficiente, sostenible y con un costo razonable se convierte en un objetivo a corto plazo. Por eso es muy importante la aplicación de técnicas o estrategias de riego que aumenten la productividad del agua, pero sin disminuir significativamente la calidad de la cosecha.

Una de las estrategias más desarrolladas es el Riego Deficitario Controlado (RDC), consistente en reducir las aportaciones de agua, por debajo de sus necesidades hídricas en los periodos en los que la falta de la misma no afecta a la producción ni a la calidad de la cosecha. En las estrategias de RDC, debemos considerar determinados factores que puedan condicionar al cultivo, como el conocimiento de los períodos críticos del cultivo, las características del suelo, el sistema de riego, entre otros. La aplicación de este tipo de estrategias ha sido ampliamente desarrollada en el ámbito de la investigación, demostrándose que no solamente se consigue una reducción del consumo de agua, sino que, en determinadas condiciones, se pueden conseguir mejoras en algunas propiedades morfológicas y organolépticas de los frutos, incrementando el valor añadido de los mismos.

El RDC consigue mejorar la eficiencia en el uso del agua por parte de la planta, disminuyendo además las pérdidas de agua por escorrentía superficial o percolación profunda. La aplicación de dotaciones de riego por debajo de las óptimas no supone caídas significativas en el rendimiento, alcanzando una mejora de la productividad del agua, asegurando la sostenibilidad de las explotaciones.

El RDC es una de las estrategias más contrastadas a nivel mundial en lo que se refiere a ahorro de agua. A su vez, no deja de ser una estrategia donde se reducen los aportes hídricos en períodos más o menos largos, siendo un factor a tener en cuenta en el sureste español, donde las temperaturas elevadas son cada vez más prolongadas en el tiempo. La Región de Murcia presenta unas



características propias de clima mediterráneo semiárido, con temperaturas medias anuales en torno a los 18-20 °C, donde las estaciones frías son cada vez más cortas, con inviernos suaves y veranos cada vez más largos en el tiempo y con temperaturas más elevadas. Estas características, donde las estaciones de frío se ven cada vez más reducidas en el tiempo y las estaciones estivales se prolongan en el mismo, hacen que aumente la demanda de agua. Esto conlleva que se requieran plantear nuevas estrategias de riego, donde la reducción en los aportes de agua se vea como último recurso.

Es por ello que, la alternancia de fuentes de agua a lo largo del año, sería una buena estrategia de riego, que no implica la reducción de aportes de agua. En este sentido, alternar fuentes de agua de calidad agronómica distinta, lograría ahorrar agua de buena calidad como la procedente del trasvase Tajo-Segura durante los períodos de menos demanda, es decir, períodos de baja demanda climática como el otoño e invierno, para poder utilizarla en períodos de mayor demanda climática como es el período estival. Este tipo de estrategias, supondrían a su vez, un menor deterioro de las propiedades físico-químicas del suelo, reduciendo la degradación del mismo, a la vez que se consiguen mantener los beneficios de utilizar AR, como es el ahorro en fertilizantes.

La alternancia de fuentes de agua aportaría equilibrio a las masas de agua, evitando la degradación de las mismas. Con ello también afectaría positivamente a disminuir la sobreexplotación de masas de agua subterráneas y su mejora medioambiental. Como consecuencia directa se eludiría la intrusión marina en zonas costeras, sobre todo lugares como la Región de Murcia.

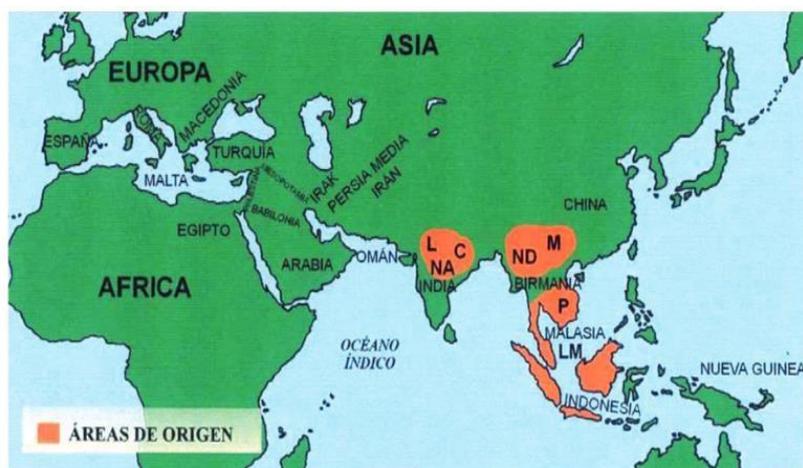
## **II.3 Cítricos**

### **II.3.1 Origen y evolución de los cítricos**

Hoy día, las variedades comerciales de cítricos que encontramos en el mercado son híbridos originados de cruces realizados entre 4 especies puras. Estas especies comparten una base genética de dichas especies puras. Actualmente, los cítricos son el principal cultivo frutal del mundo, cultivándose en más de cien

países, en una superficie de unas 7,4 millones de hectáreas, y alcanzando una producción próxima a las 102 millones de toneladas (USDA, 2017). El origen de los cítricos se centra en las zonas tropicales y subtropicales de Asia y del archipiélago malayo, con temperaturas que oscilan entre los 18 y 35 °C. Desde allí se distribuyen a lo largo de los años al resto de regiones del mundo donde hoy se cultivan cítricos. Desde Asia fueron llevados al norte de África y sudeste de Europa. Posteriormente a América por los europeos, alrededor del año 1.500. Los cítricos que se cultivan por todo el mundo se localizan entre los 40° de latitud norte y 40° de latitud sur, desde la orilla del mar hasta altitudes que sobrepasan los 1.000 m. En España el límite máximo tolerable es de 400 m y se localizan a lo largo de toda la costa levantina y parte de la atlántica.

En la península, los cítricos están presentes desde el siglo VII. El naranjo amargo y el limonero llegaron de manos de los árabes en el siglo XI a través de África y procedentes de Arabia. El naranjo dulce (*Citrus sinensis*), su presencia se remonta a mediados del siglo XV, introducido por los genoveses a través de sus rutas comerciales con Oriente. El Mandarino (*Citrus reticulata*) se introduce en España más tarde, iniciándose su cultivo a partir de material vegetal importado a la provincia de Castellón procedente probablemente de Palermo, Génova y Niza donde se conocía ya su cultivo. Finalmente, el pomelo (*Citrus paradisi*) ha sido muy recientemente introducido en España. Las primeras plantas de las que se conoce su presencia eran de la variedad "Marsh" y fueron importadas por la Estación Naranjera de Levante, en 1910 desde EEUU (Zaragoza, 1993) (Figura II.8).



*Figura II. 8 Origen especies comerciales de cítricos. C: cidra, NA: naranja amarga, L: limonero, LM: limero, P: pomelo, ND: naranja dulce, M: mandarino. Fuente: Zaragoza et al., 2011.*

Los cítricos constituyen con diferencia el principal grupo de frutales de regadío en España en cuanto a superficie cultivada. De hecho, suponen el 7,8 % de la superficie cultivada total en España, alcanzando las 297.969 hectáreas (MAPA, 2020). La superficie dedicada al cultivo de cítricos en España se concentra en la Comunidad Valenciana (54%), Andalucía (28%) y la Región de Murcia (13%), zonas costeras del este y sur de la península, localizadas sobre todo en lugares próximos al litoral y en los valles de los ríos, zonas prácticamente fuera del riesgo de heladas. La concentración de los cítricos en estas zonas del sureste español se debe sobre todo a los buenos condicionantes edafoclimáticos y la elevada tecnificación e intensificación alcanzada en la zona. España se configura como el primer país productor de la UE con el 60% seguido de Italia con el 25%, y sexto del mundo con el 5%. (MAPA, 2020). Es el principal exportador mundial de cítricos frescos, representando del orden del 25% de las exportaciones mundiales. Casi el 60% de nuestra producción cítrica se destina al mercado exterior, siendo del 80% en el caso del pomelo (MAPA, 2020).

La mayoría de la producción de mandarina se destina al mercado de productos frescos. Los principales productores son China, España y Japón, seguidos del Brasil, Italia, Egipto, Estados Unidos, Marruecos, Argentina,

Turquía, la República de Corea y el Pakistán (FAO, 2020). El consumo álgido de mandarinas en fresco, se da con las variedades de clementina sin “royaltie” que se cultivan actualmente en España y Marruecos. En los últimos años el consumo de este producto ha aumentado espectacularmente en los Estados Unidos. Su tamaño pequeño, junto con su facilidad para pelar y no tener semillas la convierten en un producto muy atractivo en el mercado.

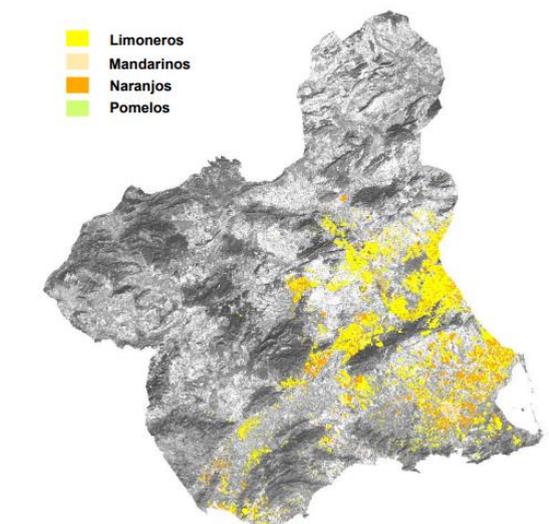
Actualmente, China es el mayor país productor de pomelos, con 5 millones de toneladas, de un total de 9 millones de toneladas en todo el mundo. España ocupa el puesto número 15 con una producción de 70.624 toneladas. (FAO, 2019) (Figura II.9).



**Figura II. 9 Producción mundial de pomelo por países. Fuente: FAO, 2019.**

La Región de Murcia cuenta con 40.000 hectáreas dedicadas al cultivo de cítricos (Figura II.10), se encuentra a la cabeza en producción citrícola, junto con Valencia y Andalucía. El cultivo de cítrico predominante en la Región de Murcia es el limonero, con 26.000 hectáreas, seguido de naranja y mandarina (CARM, 2021). Este último cuenta con unas 5.700 hectáreas, mientras que el pomelo con 1.000 hectáreas se halla a la cola de la producción citrícola en la Región, pero con una tendencia al alza en los últimos años, siendo su incremento respecto al año

anterior de un 6% (CARM, 2020). Estos datos dan a entender la importancia del sector citrícola, suponiendo un motor muy importante en la Región.



*Figura II. 10 Principales zonas de producción citrícola en la Región de Murcia. Fuente: IMIDA, 2021*

## II.3.2 El cultivo de mandarino y pomelo

### *II.3.2.1 El pomelo*

El pomelo es una especie de reciente aparición. Las primeras referencias del pomelo las encontramos bajo el nombre de “forbidden fruit” o “fruto prohibido”, y proceden del reverendo naturalista galés Griffith Hughes (1707-1758) en su obra “The natural history of Barbados”. El pomelo llegó a Florida en 1823 cerca de “Safety Harbor en la bahía de Tampa”. Según Ziegler y Wolfe (1975), el material vegetal, semillas o plantitas, procedía de las islas Bahamas. Las controversias sobre el origen y denominación del pomelo, han sido muy frecuentes y están recogidas con detalle por Kumamoto et al. (1987) y Bowman y Gmitter (1990). El pomelo fue introducido en España en 1908, en Alzira (Valencia). El pomelo era entonces

una fruta apenas conocida y poco apreciada en el mercado. La primera plantación comercial de pomelo de la que tenemos constancia era de la variedad Marsh. La planta se parece a la del naranjo, pero los frutos son de mayor tamaño.

En España, las principales zonas de cultivo del pomelo, las encontramos en el litoral mediterráneo, localizadas en las comunidades de Murcia y Valencia, así como en el suroeste de Andalucía (Figura II.12). El pomelo ocupa el 2,7% de la superficie total de cítricos de Murcia, la cual se encuentra repartida en el Campo de Cartagena, el Valle del Guadalentín y la Vega del Segura. La cosecha de pomelo en la campaña 2021 fue de 33.755 toneladas, un 30 % más que la campaña anterior y una 15% más con respecto a la media de los 5 años anteriores. La superficie cultivada de pomelo aumenta cada año gracias a su precocidad, elevada productividad y constante rendimiento, sobre todo en ciertas partes de la Región donde se apuesta por diversificar producciones en explotaciones de limón. Las principales variedades de pomelo cultivadas en la Región de Murcia son pomelo rojo (“Star Ruby” y “Rio Red”).



**Figura II. 61 Imagen Pomelo Star Ruby. Fuente: Propia**

Los ensayos de esta tesis doctoral, se llevaron a cabo en pomelo (*Citrus paradisi Macf*) (Figura II.11), plantados en el año 2005 e injertados sobre patrón macrofila (*Citrus macrophylla*) en un marco de plantación de 6 x 4 m. La variedad



de pomelo seleccionada fue “Star Ruby”, la cual surge de una mutación de pomelo Hudson obtenida en Texas mediante la irradiación de semillas en 1970. El árbol es de vigor medio y sin espinas. El fruto es de tamaño medio sin apenas semillas, de piel muy lisa, fina y delgada. Es de color amarillo con tonalidades rojizas y al ser uniforme, permite pelarlo con relativa facilidad. A diferencia de otras variedades de pomelos, la pulpa tiene un color rojo intenso y proporciona abundante zumo de sabor menos amargo que otros al ser más dulce. Su color externo es más intenso que el de otras variedades más recientes y su pigmentación interna permanece bien roja durante toda la campaña. Las variedades pigmentadas como la “Star Ruby” deben su tono rosa-rojizo al pigmento licopeno. Han ganado mucha popularidad en muchos países desplazando en producción y consumo a las variedades comunes de pulpa amarilla. Los pomelos cuanta más intensidad roja tienen, unas mayores presencias de antioxidantes presentan, como es el caso de esta variedad “Star Ruby” de intenso color rojizo. Su recolección se realiza en primera y segunda temporada, pudiendo hacerse desde finales de septiembre hasta finales de marzo y los requerimientos de calor para la coloración de la pulpa son menores que en la variedad “Redblush”. La viabilidad del polen es baja, siendo una variedad autocompatible.

La variedad “Star Ruby”, tiene un fruto de forma oblata con una corteza de color rosada y una pulpa interior de color rojiza, de un peso medio en torno a 300 – 340 (gr) y un diámetro en torno a 90 - 95 (mm). El calibre comercial se determina por el diámetro máximo de la sección ecuatorial del fruto, excluyéndose los pomelos de un diámetro inferior a 70 mm. Respecto a las características agronómicas, esta variedad es muy sensible a herbicidas residuales y a algunos insecticidas. De todas las variedades de pomelo, la “Star Ruby” es la menos exigente a temperaturas cálidas para alcanzar la pigmentación rojiza. A su vez, esta variedad presenta ligera tendencia a la alternancia de las cosechas.

El Pomelo “Star Ruby” se injertó sobre patrón “*Critus Macrophylla*”, un excelente patrón que permite una precoz entrada en producción, alta productividad y buen calibre. Las variedades injertadas sobre este pie son vigorosas, grandes y muy productivas, con características similares cuando son injertadas sobre

limonero rugoso. En cuanto a su exigencia en suelos, es un patrón rústico que ofrece muy buena resistencia a la salinidad, a la sequía y a la caliza, creciendo bien en suelos arenosos, calcáreos y con pH alto. Presenta resistencia al virus de la tristeza cuando se injerta con limoneros, pero no con mandarinos o naranjos. Es sensible a nemátodos y a Xyloporosis. Por el contrario, es tolerante a Exocortis y presenta buena resistencia a Phytophthora.



*Figura II. 72 Principales zonas de cultivo de pomelo. Fuente: MAPA (2020)*

### *II.3.2.2 El mandarino*

La mandarina probablemente fue cultivada en China desde hace varios miles de años, y la primera referencia a esta fruta se remonta al siglo 12 a.c. De su región de origen, la mandarina se propagó en la mayor parte del sudeste de Asia, y en otras partes de la India. Por el siglo X la mandarina se cultivó extensamente en las prefecturas del sur de Japón y pasaron más de 400 años antes de que la distribución de mandarina a nivel mundial se iniciase en 1805. A partir de esta introducción, se enviaron árboles a Malta, a continuación, se cree que la mandarina mediterránea evolucionó poco después bajo cultivo en Italia. Los árboles de mandarinas y sus híbridos son generalmente los más resistentes al frío de todos los cítricos cultivados comercialmente, aunque hay algunos, como el Templo tangor, que son menos resistentes que las naranjas. Sin embargo, los frutos de mandarina sufren más daño que la mayoría de naranjas y pomelos.



Las características que comparten casi todas las mandarinas son su temporada de cosecha relativamente corta y su susceptibilidad al deterioro durante la recolección, embalaje y transporte al mercado. La corteza es más frágil y sensible a enfermedades con tendencia a hincharse, mientras que internamente la carne pierde acidez y jugo y se convierte en insípido en el árbol por un período relativamente corto después de llegar a la madurez fisiológica óptima.

En este trabajo, los ensayos de campo se realizaron en mandarinos clementina de la variedad 'Orogrande' adultos (Figura II.13), plantados en 1999 e injertados sobre patrón Carrizo [*Citrus sinensis* (L.) Osb. x *Poncirus trifoliata* L.], en un marco de 5 x 3,5 m. La Clementina "Orogrande" tuvo su origen en Murcia en 1978, como consecuencia de una mutación espontánea en un árbol de variedad "clemenules", pero presenta una floración más agrupada. Se aprecian diferencias mínimas sobre la variedad original (la abscisión de brotes tiernos en floración es menor y el porcentaje de frutos a recolectar en un primer pase es mayor. El árbol es vigoroso, de gran crecimiento inicial y rápida entrada en producción. Tiene poca espinosidad y alguna agalla multiyema. La floración puede presentarse escalonada en el tiempo. El polen posee alto poder germinativo. Es una variedad partenocárpica y autoincompatible. El fruto es de tamaño similar o ligeramente superior a "Clemenules", de piel lisa, con menor número de glándulas de aceite esencial y considerado por muchos la mandarina más exquisita. Es una clementina grande y uniforme, con un color naranja intenso y un brillo natural en la piel. La pulpa es muy jugosa y con un alto porcentaje en zumo y además es de muy buena calidad y sabor. Es fácil de pelar y no tiene semillas, es posible que en alguno de sus gajos haya alguna semilla debido a la polinización de las abejas.



*Figura II. 83 Imagen del fruto de la mandarina variedad "Orogrande". Fuente: Propia*

Respecto al patrón, el mandarino se injertó sobre patrón "*citrange carrizo*", el cual, empezó a utilizarse a finales de los años setenta. Se trata de un patrón obtenido espontáneamente en Texas a partir de semillas de "Citrange Troyer". Ha sido muy utilizado en los Estados Unidos y en España. Morfológicamente es similar al "Citrange Troyer", pero su comportamiento agronómico presenta ventajas por ser más resistente a *Phytophthora* sp. y permite una mayor productividad. Es un patrón con tolerancia a Tristeza, Psoriasis, Xyloporosis y "Woody gall", siendo sensible a *Exocortis* y a nemátodos. Su cultivo se inicia pronto y a mediados de los ochenta ya se usa más que el "c. Troyer", que poco a poco dejará de emplearse, ya que el "c. Carrizo" tiene una serie de ventajas agronómicas que le han hecho convertirse en el mejor patrón (Tabla II.1).

No posee una tolerancia alta tanto a heladas, como a sequía y encharcamiento. Por el contrario, hoy día es un patrón poco a poco en desuso debido a su baja tolerancia a la salinidad, siendo patrones como el "*Citrus macrophylla*" más adecuados en zonas del levante español por el incremento en el uso de fuentes de agua no convencionales, como son las ARs.



Figura II. 94 Principales zonas de mandarina. Fuente: MAPA (2020)

		<i>Citrus Macrophylla</i>	<i>Citrango Carrizo</i>
<b>Influencia sobre la variedad</b>	Vigor	Alto	Alto
	Entrada en producción	Rápida	Media
	Producción	Muy alta	Alta
	Calidad fruto	Medio	Alta
	Tamaño fruto	Alto	Alto
<b>Tolerancia a condiciones del medio</b>	Maduración	Media	Adelanta
	Salinidad	Alta	Baja
	Caliza	Media	Baja
	Heladas	Baja	Alta
	Sequía	Media	Baja
<b>Enfermedades</b>	Encharcamiento	Baja	Baja
	Tristeza	Sensible	Alta
	Phytophthora	Resistente	Alta
	Exocortis	Tolerante	Sensible
	Psoriasis	-	Tolerante
	Xyloporosis	Sensible	Tolerante
	Armillaria	-	Sensible
Nemátodos	Sensible	Sensible	

Tabla II.1. Características principales de los patrones *Citrus Macrophylla* y *Citrango Carrizo*. Fuente: Romero-Trigueros, 2018

La Región de Murcia se sitúa como la tercera comunidad autónoma a nivel nacional en la producción de mandarinas, por detrás de la Comunidad Valenciana y Andalucía (Figura II.14). El mandarino representa el 14% tanto superficie como de producción de cítricos en la Región de Murcia. Se encuentra principalmente repartido en el Campo de Cartagena, el Valle del Guadalentín y la Vega del Segura. Respecto a las variedades de este fruto, el 60% son clementinas y el resto variedades híbridas tardías. El mandarino general ha registrado un incremento en su producción de más del 20% en los últimos años. Este aumento se debe al incremento de las híbridas tardías, en las que se incluyen nuevas variedades registradas con patentes protegidas como Afourer, Nadorcott, Orri o Tangold, entre otras (CARM-EUROPA, 2019).

#### **II.4 Relaciones hídricas**

El funcionamiento de la planta depende fundamentalmente del agua, su componente principal. La relación que se establece entre la planta y el agua incluye la absorción por el sistema radicular, su transporte por medio de los tejidos vasculares y su salida por transpiración.

Las relaciones hídricas (Figura II.15), por lo tanto, están determinadas por la absorción de agua por las raíces, su transporte por el xilema y el movimiento desde las hojas hacia la atmósfera. La transpiración es fundamental en los procesos fisiológicos de las plantas, la cual, se produce debido al gradiente de potencial del agua existente entre la raíz y la parte aérea, facilitando así, el transporte de agua y nutrientes. La regulación de la absorción de agua por parte de la planta, su influencia en el crecimiento y las pérdidas por transpiración, constituyen la principal respuesta de la misma a las condiciones ambientales.

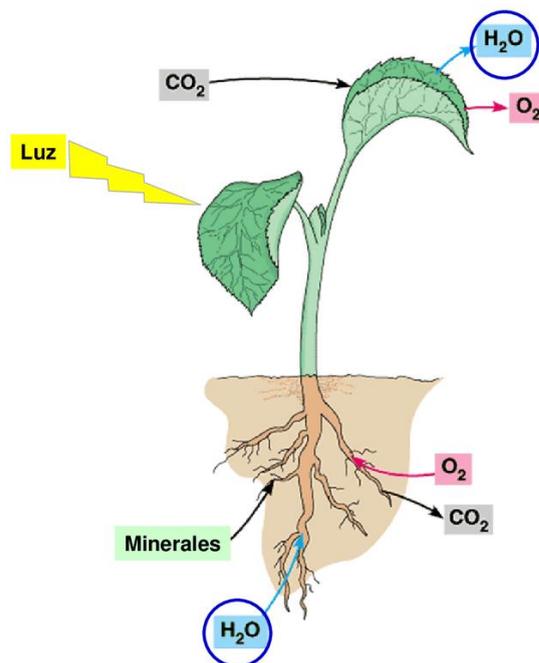
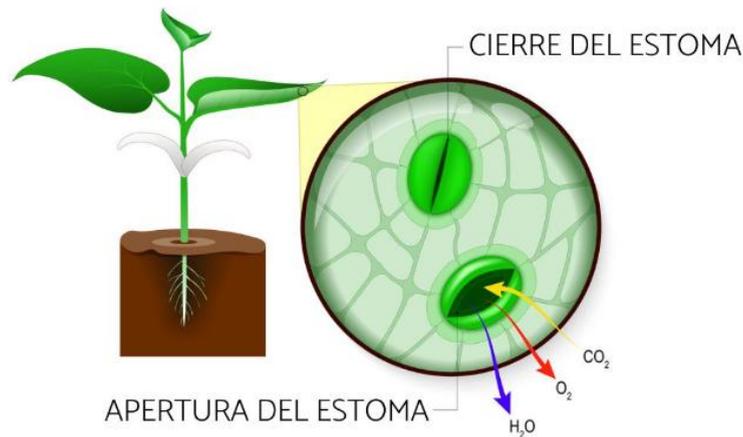


Figura II. 15 Relaciones hídricas de la planta. Fuente: Docsity.com

La apertura y cierre de las estomas tienen una función fundamental en el sistema suelo-planta-atmósfera. Cuando los estomas están totalmente abiertos, la resistencia a difusión del  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  es mínima. Cuando los estomas están completamente cerrados, la resistencia estomática aumenta, impidiendo en gran medida, la entrada de  $\text{CO}_2$  y la pérdida de  $\text{H}_2\text{O}$ . La apertura y cierre de estomas, es el mecanismo más rápido que dispone la planta para ajustarse a las variaciones ambientales. Esta regulación de la apertura estomática ocurre por mecanismos complejos, que parecen dirigirse siempre en el sentido de minimizar las pérdidas de agua y maximizar la asimilación de  $\text{CO}_2$ . Por lo tanto, los estomas juegan un papel muy importante en la entrada de  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$  en la planta, facilitando así el proceso fotosintético (Figura II.16).



*Figura II. 16 Apertura y cierre de estomas. Fuente: ecologiaverde.com*

Un factor a tener en cuenta, es la característica del patrón sobre el que se injerta la variedad. La respuesta de la planta a estreses abióticos, los cuales tienen una gran influencia en las relaciones hídricas, depende también de las características del patrón, el cual puede inducir tolerancia a este tipo de estrés (Syvertsen y Levy, 2005). Las características del patrón se asocian con diferencias en la conductividad hidráulica de la raíz, determinando la capacidad del patrón para aportar agua y nutrientes a la planta. A su vez, las relaciones hídricas se ven influenciadas por las condiciones ambientales, pudiendo producir fenómenos de estrés en la planta, así como el estrés hídrico y el estrés salino.

## **II.4.1 Indicadores del estado hídrico de la planta**

### **II.4.1.1 Conductancia estomática ( $g_s$ )**

La conductancia estomática ( $g_s$ ) es la variable que mide el grado de apertura de las estomas situadas en las hojas, al regular el intercambio gaseoso con el ambiente que la rodea. Este indicador, se ve afectado por factores como, la intensidad luminosa, la temperatura, la diferencia de humedad absoluta entre la hoja y el aire, la edad de la hoja, la concentración de CO<sub>2</sub> y el propio potencial hídrico (Ruiz-Sánchez et al., 2000).

Existen instrumentos de medida, como el porómetro, o instrumentos de medida como el sistema de medida portátil de intercambio gaseoso (LICOR Modelo LI-6400), pero no existen actualmente, instrumentos para la medida automatizada de gs.



**Figura II. 17 Medidor portátil de fotosíntesis y otras variables fisiológicas como conductividad estomática y transpiración. Fuente: [www.licor.com](http://www.licor.com)**

Un instrumento muy utilizado en investigación es el LI-6400 (Figura II.17), capaz de proporcionar información sobre las respuestas de las plantas como la velocidad de asimilación de  $\text{CO}_2$ , conductancia estomática, transpiración, eficiencia en el uso del agua y en la corboxilación y uso de la luz solar fotosintéticamente activa (luz PAR).

Para su funcionamiento, se calibra el equipo, y se seleccionan las plantas y las hojas a medir; se recomienda una de la parte intermedia de la planta, bien desarrollada y expuesta al sol. Se coloca la hoja dentro de la cámara, se cierra, se presiona por unos momentos hasta que la lectura se estabilice; luego se abre la cámara y se procedemos con la siguiente hoja, siendo este método rápido y fácil (Papathanasiou et al., 2012).

#### II.4.1.2 Conductancia hidráulica (K)

La conductancia hidráulica (K) está considerada como uno de los principales factores que controlan el movimiento del agua a través del sistema suelo-planta, teniendo una influencia importante en la transpiración de la planta y en los procesos fisiológicos relacionados con ésta. Es una variable fundamental, ya que determina la capacidad de transporte de agua y su absorción, además de la capacidad de absorción de los nutrientes por parte de la planta. Así pues, K, es una parte fundamental de las relaciones hídricas de la planta.

Los distintos patrones influyen en K, debido principalmente a la distribución del sistema radicular, afectando al desarrollo tanto de la planta como del fruto frente a factores ambientales, los cuales pueden provocar en la planta situaciones de estrés. Diferencias en la conductancia hidráulica de la raíz, causan diferencias en el transporte de agua a la parte aérea de la planta, influyendo en el estado hídrico de la hoja y por tanto en el crecimiento y en las respuestas fisiológicas.

Una mayor conductividad hidráulica del sistema radicular va asociada con una mayor conductancia estomática y por lo tanto a una mayor transpiración, sin embargo, en algunas ocasiones, la mayor conductancia hidráulica podría ser contraproducente, causando una mayor extracción de agua y como consecuencia, sometiendo a la planta a un déficit hídrico. Al someterse al cultivo a un estrés hídrico severo, la anatomía de la raíz puede cambiar, lignificándose y, como consecuencia de ello, disminuyendo la conductancia hidráulica.

En este contexto, se ha demostrado que, en muchas especies vegetales, la conductancia hidráulica de las raíces disminuye considerablemente en condiciones de déficit hídrico (Sumner y Boswell 1981, Cruz et al. 1992, North y Nobel 1996, Lo Gullo et al. 1998 Martre et al. 2001, North et al. 2004), recuperándose cuando se recupera el potencial hídrico del suelo (North y Nobel 2000, Martre et al. 2001).



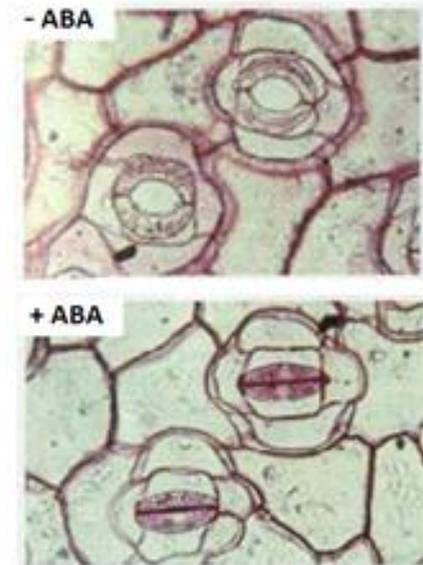
#### II.4.1.3 K y g: frente a estreses abióticos

Los estreses abióticos se dan como consecuencia de factores, que pudiendo ser físicos o químicos son causados por cambios o condiciones ambientales como la sequía (estrés hídrico), variaciones de temperatura (estrés por temperaturas extremas), viento (estrés mecánico), exceso de agua (estrés por anaeróbisis) y exceso de sales en el suelo (estrés salino). Estas variaciones desestabilizan el ambiente de los cultivos y generan tensiones que afectan la productividad de las plantas, principalmente durante períodos sensibles como la floración y el cuaje.

El estrés por déficit hídrico se produce en las plantas en respuesta a un ambiente de escasez de agua, aunque no sólo ocurre cuando hay poca agua disponible, sino también puede deberse a una elevada salinidad del suelo. En cítricos, el déficit hídrico reduce el crecimiento vegetativo, la cosecha, el tamaño del fruto y, algunas veces, la calidad, causando importantes pérdidas económicas en las explotaciones (Hilgeman y Sharp 1970, Levy et al. 1978, 1979, Castel y Buj 1990, Ginestar y Castel 1996, González-Altozano y Castel 1999, Romero et al. 2006). El mecanismo por el cual las plantas limitan la pérdida de agua por transpiración bajo condiciones de estrés hídrico es el cierre estomático, reduciendo la asimilación neta de CO<sub>2</sub> (García-Sánchez et al. 2007). La reducción de la conductancia estomática y de la asimilación de CO<sub>2</sub> en los cítricos está atribuida a una gran diferencia de la presión de vapor entre la hoja y el aire. Cuando el agua del suelo no está disponible, los cítricos son más sensibles a temperaturas del aire elevadas y a altos déficits de presión de vapor, lo que resulta en un cierre estomático y en una reducción de la asimilación de CO<sub>2</sub>.

El potencial hídrico de las hojas, el cual nos proporciona el estado hídrico de las plantas, puede aumentar cuando los estomas se cierran, de manera que, cuando existe una alta demanda evaporativa, el cierre de los estomas permite que los cítricos puedan reducir el uso del agua y evitar el estrés. En respuesta al estrés hídrico, el sistema radical puede enviar señales a las hojas, en las cuales se induce el cierre estomático para evitar la pérdida de agua. Una de estas señales, es la producción de ácido abscísico u hormona del estrés (ABA) (Figura II.18) en las raíces, el cual es transportado a través del xilema a las hojas, observándose en hojas

de plantas sometidas a estrés hídrico, un incremento de la concentración de ABA a medida que disminuye la turgencia.



*Figura II. 18 Cambios en el contenido de ABA en respuesta al estrés hídrico (2020).  
Fuente: Scileo.com*

Los cítricos están considerados como un cultivo sensible a la salinidad, dependiendo también de las características del patrón para excluir los iones salinos (Figura II.19). Con concentraciones salinas moderadas sufren desórdenes fisiológicos que impiden el crecimiento de la planta y reducen la producción de frutos (Boman et al., 2005). La salinidad reduce el potencial hídrico del suelo, disminuyendo la absorción de agua por la planta, teniendo que ajustarse osmóticamente (Munns y Gilliam, 2015).

Altas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  en hojas pueden originar desórdenes fisiológicos en los cítricos y, es la causa principal de toxicidad iónica específica, afectando también a la fotosíntesis y transpiración. La reducción de la fotosíntesis de las hojas de cítricos con una dosis de riego normal, pero con agua con alta concentración de  $\text{NaCl}$  ha sido asociada con la toxicidad específica del  $\text{Cl}^-$  y/o del  $\text{Na}^+$  más que a factores estomáticos (Storey y Walker 1999, García-Sánchez y Syvertsen 2006; Munns y tester, 2008; Hasegawa, 2013; Dekoum et al., 2017).



Además, el estado hídrico de la planta se ve alterado por la salinidad debido al estrés osmótico, el cual impide la absorción de agua. Estas alteraciones disparan mecanismos específicos que controlan el ajuste osmótico de la célula evitando la pérdida de agua. Sin embargo, en el caso de estrés salino, la inhibición de la capacidad fotosintética es más importante que el estrés osmótico y la reducción de la conductancia estomática en la limitación de la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> (Levy y Syvertsen 2004). La absorción de Cl<sup>-</sup> en cítricos, y de este modo, la tolerancia y/o sensibilidad a la salinidad ha sido relacionada con el crecimiento de la planta, con el uso del agua y con la transpiración.

Los patrones de cítricos pueden regular la cantidad de Cl<sup>-</sup> acumulado en las hojas de la variedad injertada (Levy y Syvertsen, 2004). De esta manera, la tolerancia de los cítricos a la salinidad depende principalmente del patrón, el cual determina la capacidad de exclusión de iones en la hoja. El patrón mandarino Cleopatra está considerado como un excluidor de Cl<sup>-</sup> mientras que citrange Carrizo se considera acumulador de Cl<sup>-</sup> (Figura II.19).

PATRONES	SALINIDAD
CITRANGE TROYER	Sensible
CITRANGE CARRIZO	Sensible
SWINGLE CITRUMELO CPB 4475	Resistencia media
PONCIRUS TRIFOLIATA	Muy sensible
NARANJO AMARGO	Resistencia media
NARANJO DULCE	Resistencia media
MANDARINO CLEOPATRA	Muy resistente
MANDARINO COMÚN	Resistencia media
CITRUS MACROPHYLLA	Resistente
CITRUS TAIWANICA	Resistente
CITRUS VOLKAMERIANA	Resistencia media
FORNER-ALCAIDE N° 5	Resistencia media
FORNER ALCAIDE N° 2418	Resistencia media

**Figura II. 19 Comportamiento agronómico de patrones frente a condiciones de salinidad.**  
**Fuente: IVIA (2014)**

Dependiendo de la especie, el patrón, las condiciones a las que se vean sometidas las plantas, así como su estado hídrico, el comportamiento de los cítricos también se puede catalogar como isohídrico o anisohídrico, en función de la regulación estomática a lo largo del día (Romero Trigueros et al. 2018). Las especies con un comportamiento isohídrico son aquellas que cierran sus estomas cuando experimentan una caída en el potencial hídrico del suelo o una demanda atmosférica. Al contrario, las plantas con un comportamiento anisohídrico no cierran sus estomas y continúan transpirando aun cuando el contenido hídrico del suelo disminuya. Como consecuencia de ello, el potencial hídrico foliar cae, produciendo un estrés hídrico en la planta.

#### **II.4.1.4 Intercambio gaseoso y potencial hídrico**

La disponibilidad del agua en la planta tiene dos aspectos diferentes dentro de la denominación de relaciones hídricas. Por un lado, está la concentración de agua en los tejidos y, por otro, la energía asociada a esa agua ó estado hídrico. Uno de los efectos más evidentes del estrés salino es la reducción del potencial osmótico de la solución del suelo y, consecuentemente, el potencial hídrico del suelo, lo cual se traduce en una reducción en la capacidad de absorción de agua por las plantas, dando lugar en las mismas, síntomas similares a los efectos del estrés hídrico.

El agua es esencial para el desarrollo de las plantas, constituyendo el 85-90% del peso de la planta, aunque partes como la madera (35-75%) tengan un contenido hídrico inferior. La mayor parte de ella, se utilizada para permitir el transporte de nutrientes en toda la planta, siendo esencial para procesos como el crecimiento celular, intercambio de gases en las hojas, transporte o el mantenimiento de la rigidez y de los tejidos no lignificados.

Todos los procesos de transporte y distribución de nutrientes, dependen de los movimientos del agua por el organismo. El flujo depende de la cantidad de agua absorbida por las raíces y la pérdida a la atmósfera por las hojas, de forma que disminuciones pequeñas en el flujo (por pérdida excesiva o por absorción insuficiente), conducen a déficit hídrico y alteraciones graves en el funcionamiento de la planta.



El déficit hídrico está asociado a ambientes con baja pluviometría o con distribución irregular de precipitaciones y puede ser definido como cualquier contenido de agua de un tejido, que se encuentre por debajo del contenido hídrico óptimo de la planta. Además, tiene diversos efectos sobre el crecimiento, uno de los cuales es la limitación del crecimiento del área foliar, siendo la fotosíntesis proporcional a ella (Taiz L, et al; 2006).

En relación con la fotosíntesis, varios estudios realizados con cítricos, muestran que la velocidad de asimilación de CO<sub>2</sub> y la conductancia estomática disminuyen con la presencia de NaCl en la zona radicular (Gimeno y col., 2010; Dekoum et al., 2017). Los factores responsables de los efectos de la salinidad sobre la fotosíntesis son complejos ya que la respuesta de la planta varía con la época del año, con la edad del árbol y de la hoja y con las diferentes condiciones ambientales, especialmente en zonas mediterráneas (Grattan, 2013).

Los mecanismos por los que la salinidad afecta a la fotosíntesis pueden considerarse como resultado de los siguientes factores:

- **Deshidratación de las membranas celulares.** Debido a esto, se reduce la difusión de CO<sub>2</sub>, provocando que las concentraciones altas de sales en el suelo y en el agua creen un incremento elevado de la presión osmótica del suelo, reduciéndose la disponibilidad de agua para las plantas.
- **Reducción del suministro de CO<sub>2</sub> como consecuencia del cierre estomático.** La reducción en la conductancia estomática tiene como consecuencia una disponibilidad limitada de CO<sub>2</sub> para las reacciones de carboxilación.
- **Toxicidad causada por los iones salinos Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>.** Se han realizado estudios donde se encuentra una alta relación causa-efecto entre reducción de la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y altas concentraciones de Cl<sup>-</sup> y/o Na<sup>+</sup> en hojas (Gimeno y col., 2010; Dekoum et al., 2017).

- **Deficiencia de K<sup>+</sup>.** La participación de K<sup>+</sup> en la producción de adenosín trifosfato (ATP) es fundamental como fuente de energía. Cuando las plantas son deficientes en potasio, el nivel de fotosíntesis y de producción de ATP se ven reducidos y todos los procesos dependientes del ATP se ralentizan.

El transporte de agua se realiza siempre a favor de potencial hídrico (de alto “ $\Psi$ ” a bajo “ $\Psi$ ” hasta equilibrar el potencial hídrico del medio). La velocidad del transporte del agua dependerá del diferencial de potencial hídrico  $\Delta\Psi$ .

A excepción de suelos salinos, el suelo contiene poca cantidad de solutos y la presión hidrostática varía poco en las capas superficiales, así, el potencial hídrico del suelo dependerá fundamentalmente del tamaño y naturaleza de las partículas que constituyan su matriz. La capacidad de retención de agua por un suelo (capacidad de campo) determina que, cuando el suelo está totalmente mojado, su potencial hídrico es 0. A medida que se seca desciende el potencial de matriz y aumentará la capacidad de retención de agua.

En el interior de la planta, el potencial hídrico es elevado en las raíces y disminuye progresivamente en el tallo, fundamentalmente por una disminución en el potencial de presión hidrostática generado por la evaporación del agua en las hojas. De esta forma, el agua puede ascender de forma pasiva por el xilema.

El agua circula entre dos puntos con distinto potencial hídrico, siempre de mayor a menor. Dicho potencial hídrico ( $\Psi$ ) es la resultante de una serie de fuerzas que adhieren el agua al suelo o a los tejidos, en contraste con la situación ideal del agua pura y sin ninguna fuerza que la adhiera (agua “libre”), salvo la presión ambiental. Como se adopta el valor 0 para este potencial de referencia del agua pura “libre”, los valores de potencial hídrico son siempre negativos. Las fuerzas que actúan sobre el agua permiten descomponer el potencial hídrico en una serie de componentes:



$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

Dónde:

$\Psi_p$ : Presión hidrostática.

$\Psi_s$ : Potencial osmótico o de solutos ( $\Psi_o$ ).

$\Psi_m$ : Potencial matricial.

$\Psi_g$ : Potencial gravitatorio.



**CAPÍTULO III.**  
**MATERIALES**  
**Y**  
**MÉTODOS**



### III.1 Condiciones experimentales y material vegetal

Los estudios experimentales de la tesis doctoral se llevaron a cabo en una finca comercial de cítricos llamada “lo Montero” (Figura III.2), ubicada al nordeste de la región de Murcia en el paraje de Campotéjar a 7 Km al norte de Molina de Segura ( $38^{\circ}07'N$ ,  $1^{\circ}13'W$ ) (Figura III.1). Es una zona semiárida con una evapotranspiración potencial de referencia ( $ET_0$ ) en torno a 1320 mm/año y una media anual de precipitaciones que no supera los 350 mm (Bayona, 2009). Estas precipitaciones suelen ser de carácter torrencial y acontecen en los meses de media a baja demanda climática.



**Figura III.1** Ubicación de la finca experimental en Campotéjar-Murcia. Fuente: Adaptada de Google.

La finca tiene un total de 12,2 ha de cultivo de cítricos. Para realizar los ensayos, se seleccionó una parcela de 0,5 ha cultivadas con Mandarinos (*Citrus clementina* cv. ‘Orogrande’) adultos (Figura III.3), plantados en el año 2000 e injertados sobre patrón Carrizo [*Citrus sinensis* (L.) Osb. x *Poncirus trifoliata* L.], en un marco de 5 x 3,5 m. Otra parte de los ensayos se llevó a cabo en una parcela de 0,5 ha cultivadas en pomelo (*Citrus paradisi* Macf), plantados en el año 2005 e injertados sobre patrón macrofila (*Citrus macrophylla*) en un marco de plantación

de 6 x 4 m (Figura III.4). Para el cultivo del pomelo, se utilizaron un total de 144 árboles, con un marco de plantación de 4 m entre plantas y 6 m entre filas, mientras que en mandarino se utilizaron un total de 192 árboles, con un marco de plantación de 3,5 m entre plantas y 5 m entre filas.



**Figura III.2. Finca experimental “Lo Montero”: (1) Parcela de mandarinos, (2) EDAR del norte de Molina de Segura, (3) Trasvase Tajo-Segura y (4) Parcela de Pomelos. Fuente: Adaptada de Google Maps**

Ambas parcelas experimentales disponían de un sistema de riego localizado con un lateral por hilera de árboles y 3 goteros auto-compensantes de 4 L/h por árbol separados de 90 cm entre sí. La gestión del riego se realizó empleando un programador de riego tipo NTC 116 (NutriControl) instalado en el cabezal del sistema de riego. Los aportes de agua fueron programados en base a la evapotranspiración diaria del cultivo “ET<sub>c</sub>” acumulada durante la semana anterior. Los valores de “ET<sub>c</sub>” se estimaron a partir de la evapotranspiración de referencia “ET<sub>0</sub>”, calculada mediante el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), con un coeficiente de cultivo local y mensual de acuerdo con Nicolás et al. (2016) para mandarino y Pedrero et al. (2015) para pomelo. Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica (Campbell scientific Ltd, Shepshed, UK) situada en la parcela experimental. La media del área de sombreado de los árboles fue superior



al 65% de la superficie total de la planta. Así, y de acuerdo con Fereres y Goldhamer 1990, el coeficiente de corrección representa la relación entre la superficie de sombreado y la ET en arboles jóvenes, considerando 1 el coeficiente para arboles adultos.



*Figura III.3 Cultivo del pomelo. Fuente: Propia*



*Figura III. 4 Parcela mandarino. Fuente: Propia*

### **III.2 Calidad de agua y tratamientos de riego.**

Para el ensayo se utilizaron dos fuentes de agua de calidad agronómica distinta. Una fuente procedente del agua del trasvase "Tajo-Segura" (AT) (Figura III.5), con una  $CE_a$  en torno a  $1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Otra fuente (AR) (Figura III.6), procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales 'Molina Norte', cercana a la finca experimental, con una  $CE_a$  media variable a lo largo del año entre 3 y  $5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ . El

AR se mezcló automáticamente en el cabezal de riego con AT para reducir el valor de la CE a  $\approx 3-3.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , valor considerado umbral límite de afectación para este tipo de cultivos (García-Sánchez et al., 2002). Para caracterizar la calidad del agua se recogieron mensualmente muestras de agua de cada fuente, para su posterior análisis.



*Figura III. 5 Trasvase Tajo-Segura. Fuente: Propia (2023)*



*Figura III. 6 EDAR Molina norte. Fuente: ESAMUR (2023)*

En el desarrollo de la tesis se plantearon ocho tratamientos distintos (Figura III.7). Dos tratamientos control (**AT-CT** y **AR-CT**), regados con agua procedente del trasvase y depuradora para cubrir el 100% de la ET<sub>c</sub> durante todo el ciclo del cultivo. Dos tratamientos RDC (**AT-RDC** y **AR-RDC**), regados con agua procedente del trasvase y depuradora para cubrir el 50% de la ET<sub>c</sub> durante la fase II del estado fenológico de la planta y el 100 % de la ET<sub>c</sub> durante el resto

del ciclo productivo. Dos tratamientos duales (**AT<sub>c</sub>** y **AR<sub>c</sub>**) regados con AT y AR, en los que la principal característica es la alternancia de fuentes de agua a lo largo del año sin ninguna restricción cubriendo el 100% de la ET<sub>c</sub> durante todo el ciclo del cultivo. El cambio de fuente de agua se realiza en el comienzo de la fase II del estado fenológico de la planta, manteniéndola durante la misma. Dos tratamientos de riego (**AT-nI**, **AR-nI**) regados con AT y AR respectivamente, donde la principal característica es la supresión del riego durante un período de dos meses, coincidiendo con la fase II de crecimiento del fruto. En nuestro caso esta fase está comprendida entre junio y septiembre, pudiendo ser de entre 55 a 65 días de aplicación y se escogió por ser menos susceptible al estrés hídrico (González-Altozano and Castel 1999).

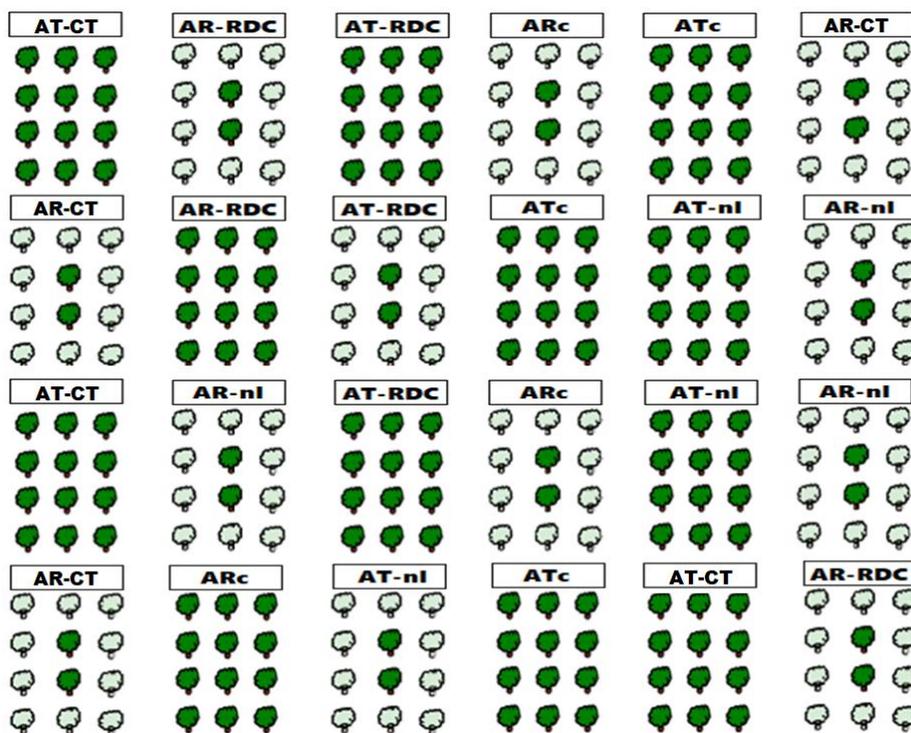
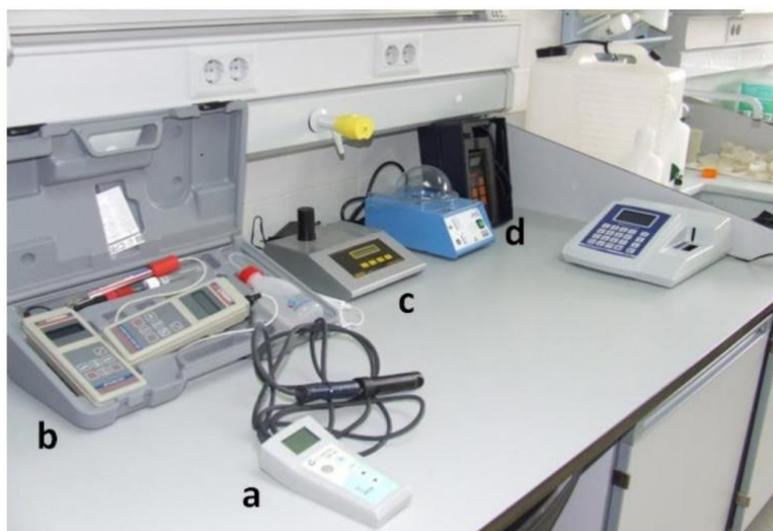


Figura III.7. Esquema tratamientos del ensayo. Fuente: Propia

### III.3 Análisis del agua de riego.

La calidad del agua de riego se determinó mediante análisis físico-químico. Para ello se llevó a cabo un seguimiento de los parámetros de conductividad eléctrica ( $CE_a$ ) y sólidos disueltos totales (SDT) medidos con un equipo multiparamétrico Cryson-HI8734 (Crisom Instruments, S.A., Barcelona, España), pH, medido con un pH-metro Cryson-507 (Crisom Instruments, S.A., Barcelona, España) y turbidez, medida con un turbidímetro Dinko D-110 (Dinko Instruments S.A., Barcelona, España) (Figura III.8).



*Figura III.8 Equipos para la evaluación de la calidad del agua: a) medidor de oxígeno disuelto, b) pH-metro, c) turbidímetro y d) equipo multi-rango, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (SDT). Fuente: Romero-Trigueros, (2018).*

La concentración de cationes se determinó mediante un equipo de espectrometría de emisión con plasma acoplado inductivamente (ICP-ICAP 6500 DUO Thermo, UK), mientras que los aniones ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$  y  $SO_4^{2-}$ ) se analizaron por cromatografía iónica con un cromatógrafo de líquidos (Metrohm, CH) (Figura III.9).



**Figura III.9** Equipo de espectrometría de emisión con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-iCAP 6500 Duo Thermo y Cromatógrafo iónico Metrohm. Fuente: sstti.ua.es.

### III.4 Medidas de la planta y el suelo.

#### III.4.1 Termometría infrarroja.

La termometría infrarroja (IRT) es una de las técnicas de evaluación del estrés hídrico mediante observaciones de la parte aérea del cultivo. La utilización de la temperatura del dosel de un cultivo con esta finalidad se ha estudiado desde hace tiempo y hay trabajos de distintos autores (Idso y Clawson, 1986; da Silva *et al.*, 1995) que constituyen una revisión sobre las posibles aplicaciones del procedimiento.

Diversos estudios realizados, determinaron que la temperatura de la planta, específicamente la temperatura de las hojas, es un buen parámetro para determinar el estado hídrico de la planta, y de esta manera, su necesidad de riego (Idso *et al.*, 1981; Jackson *et al.*, 1981). Se formuló el CWSI, o Crop Water Stress Index (índice de estrés hídrico del cultivo), el cual se basa, principalmente, en la asociación del diferencial de temperatura entre el dosel vegetal y el aire, incluyendo la variabilidad ambiental, debida al déficit de presión de vapor (DPV). Con el desarrollo de los termómetros infrarrojos portátiles, la tarea de medir la temperatura del dosel o copa de los árboles, se ha hecho mucho más fácil, impulsando a su vez la utilización del CWSI. Así pues, el CWSI determinado por la relación entre el diferencial térmico cultivo-ambiente y DPV, podría ser un

importante y útil parámetro a considerar, a la hora de realizar la programación de riego de un cultivo.

No obstante, para obtener mediciones confiables de la temperatura del dosel mediante termometría, la técnica se debe practicar sobre cultivos con cobertura completa, en condición de cielo despejado y relativamente sin viento (Turner, 1997). El objetivo es establecer la potencialidad de un índice para determinar la condición de estrés hídrico a partir de mediciones de la temperatura del dosel vegetal y evaluar el alcance de esta técnica a través de la observación simultánea de los perfiles de temperatura y humedad del aire sobre el dosel del cultivo.

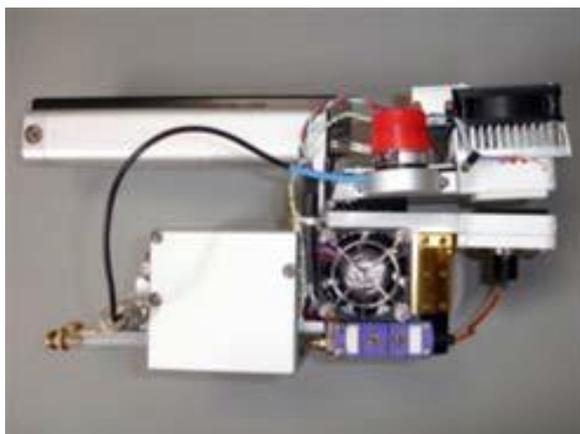
Para llevar a cabo este estudio, se contó con sensores de temperatura infrarrojos de la marca Apogee Instruments (Figura III.10), los cuales se colocaron en la perpendicular del dosel del cultivo mediante un mástil de aluminio con un brazo de montaje horizontal que terminaba sobre el centro de la cubierta. Los sensores tenían un campo de visión angular de  $22^\circ$  y todos ellos median en continuo.



*Figura III. 10 Sensor termometría marca Apogee. Fuente: Apogee instruments*

#### **III.4.2 Medidas fisiológicas. Intercambio gaseoso y potencial hídrico.**

En esta tesis doctoral, para las medidas de campo, los parámetros de intercambio gaseoso foliar (fotosíntesis neta [ $A$ ] y conductancia estomática [ $g_s$ ]) se determinaron en días claros y en hojas adultas, completamente expandidas y del segmento medio de cada árbol.  $A$  y  $g_s$  se determinaron con un equipo de fotosíntesis portátil (LI-6400 Li-Cor, Lincoln, Nebraska, USA)(Figura III.12) equipado con una cámara de fluorescencia foliar con cubeta de  $2\text{ cm}^2$  LI-6400 y un inyector de  $\text{CO}_2$  LICOR 6400 (Figura III.11). Las medidas fueron realizadas a una concentración de  $\text{CO}_2$  de 400 ppm (similar a la concentración de  $\text{CO}_2$  ambiental), una intensidad de luz saturante de  $1200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y a temperatura y humedad relativa ambiental. El flujo de aire se ajustó a  $300\ \text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ . Las mediciones se realizaron en hojas expuestas a la luz solar.

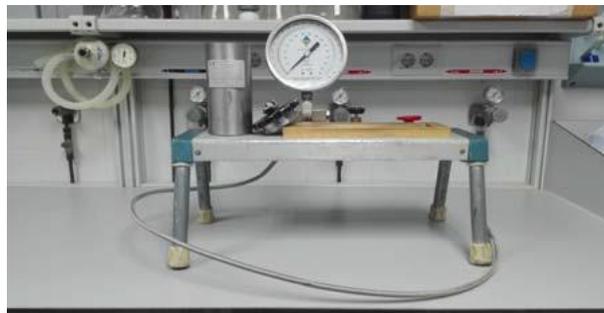


*Figura III. 11 Cámara de luz LED (6400) del equipo de fotosíntesis portátil LI-6400. Fuente: Propia.*

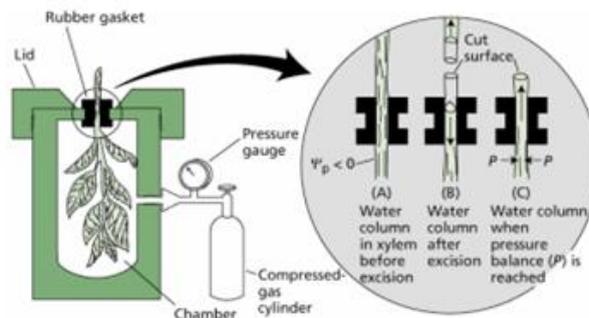


*Figura III. 12 Equipo de fotosíntesis portátil LI-6400 Licor. Fuente: Propia.*

El  $\Psi_m$  se midió a mediodía solar en hojas cercanas al tronco, envueltas en sobres de aluminio al menos 2 h antes de la medida, utilizando una cámara de presión (modelo 3000 Pressure extractor, Plant Water Status, Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, California, USA) (Figura III.13 y Figura III.14).



*Figura III. 13 Cámara de presión modelo 3000 Soil Moisture Equipment Corp. Fuente: Propia.*



*Figura III. 14 Funcionamiento de la Cámara de presión. Fuente: Slide.com.*

### III.4.3 Medidas de suelo

Se tomaron muestras de suelo en todos los tratamientos estudiados, antes y después de realizar la alternancia de fuentes de agua de riego (Figura III.15). Las

muestras se cogieron a 30 cm de distancia del emisor y a 30 cm de profundidad, coincidiendo con la zona de mayor concentración de raíces. La  $CE_s$  se determinó mediante la preparación de la pasta saturada, midiendo en el extracto de la misma (Figura III.15). A su vez, se determinaron los valores de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  (Figura III.16).



**Figura III.15 Muestreo de suelo. Fuente: Propia**

La Relación de Absorción de Sodio (RAS) es un cálculo a partir de las concentraciones de sodio, magnesio y calcio. El sodio (Na) contenido dentro del agua de riego al entrar en contacto con el suelo propicia la dispersión de los coloides o arcillas, asimismo desplaza a cationes divalentes como calcio (Ca) y magnesio (Mg). Se reduce la facilidad con la que el suelo conduce el agua y oxígeno dentro de su perfil, afectando negativamente sobre la fertilidad del suelo al reducir la aireación, incrementar el pH y disminuir la disponibilidad de otros nutrientes esenciales para el cultivo.

Es necesario derivar y definir una nueva relación de cationes en lugar de RAS, que indicará los efectos de Na, K, Mg y Ca en la estabilidad estructural del suelo. Esto se logra utilizando una fórmula análoga al RAS pero que incorpora selectivamente los efectos dispersivos del Na y K, por un lado, y los efectos floculantes del Ca y Mg. Dicha fórmula se denomina CROSS y se define como “Relación catiónica de la estabilidad estructural del suelo”.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

$$\text{CROSS} = \frac{(\text{Na}^+ + 0.56\text{K}^+)}{\sqrt{\left[\frac{\text{Ca}^{++} + 0.6\text{Mg}^{++}}{2}\right]}}$$

*Figura III.16 Índice RAS y CROSS. Fuente: Propia*

La importancia del RAS<sub>s</sub> (Figura III.16), deriva en que, a medida que aumentan los niveles de Na, el suelo se vuelve más salino, impidiendo este ión la interacción de otros elementos en suelo, provocando una degradación de la estructura del mismo. La característica principal de los suelos salinos, es la presencia de altas concentraciones de sales solubles, lo cual incrementa el potencial osmótico de la solución del suelo, causando estrés fisiológico, dificultando la absorción de agua por la planta y facilitando situaciones de déficit hídrico, impidiendo la capacidad de crecimiento del cultivo (Terrazas et al., 2018). La salinidad reduce la disponibilidad de agua para la planta, aumentando el esfuerzo que ejerce la planta para extraer el agua (Medina et al., 2016). Además, las altas concentraciones de Na alrededor de las raíces impide la absorción de nutrientes por las mismas (Medina et al., 2016).

El cálculo del índice CROSS<sub>s</sub> (Figura III.16), surgió debido al aumento de concentraciones elevadas de potasio (K) en el suelo por el uso de AR (Alla G Marchuck et al., 2010). Este parámetro permite parametrizar los efectos que tendrían los cationes monovalentes Na y K y divalentes Ca y Mg en la estructura del suelo. La sodicidad, caracterizada por una alta proporción de iones monovalentes Na en complejos de intercambio catiónico en relación con los cationes divalentes Ca y Mg, es un problema muy extendido, ya que puede provocar la disgregación del suelo, baja conductividad hidráulica y mala aireación. A su vez, se reconoce cada vez más, que la presencia de K también puede contribuir



a los problemas de estabilidad estructural del suelo (Xueying et al., 2021).

Los valores de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ , son parámetros de gran importancia en este tipo de estudios, cuando se usan fuentes de agua salinas como es el AR. El  $RAS_s$  es fundamental, ya que a medida que aumentan los niveles de Na, el suelo se vuelve más salino, impidiendo este ión la interacción de otros elementos como Ca y Mg en el suelo, provocando una degradación de la estructura del suelo. Además, altas concentraciones de Na alrededor de las raíces impiden la absorción de nutrientes por las mismas. El índice  $CROSS_s$  nos permite parametrizar los efectos que tendrían los cationes monovalentes (Na y K) y divalentes (Ca y Mg) en la estructura del suelo.

### III.5 Medidas de calidad de la fruta.

En las etapas finales del crecimiento y el desarrollo de la fruta, ocurre el proceso de maduración en dos pasos: la madurez fisiológica y organoléptica. La madurez fisiológica, la cual se completa adecuadamente en el árbol, es cuando el fruto alcanza su máximo tamaño. La maduración organoléptica hace referencia al proceso por el cual, las características sensoriales que las definen como comestibles, se pueden completar tanto en el árbol como una vez cosechado. Los cambios más palpables durante el proceso de maduración son el color, sabor, olor, textura, etc. Estos cambios son el resultado de la profunda reestructuración metabólica y química que se desencadena dentro del fruto, incluyendo: 1) la modificación del color a través de la alteración en el contenido de clorofilas, carotenoides y la acumulación de los flavonoides; 2) la modificación de la textura debido a la alteración de la turgencia; 3) la modificación de azúcares y ácidos orgánicos, que afectan la calidad nutricional, el sabor y el aroma del fruto (Giovannoni, 2004; Seymour *et al.*, 2013; Dos Santos *et al.*, 2015).

Debido a la importancia de obtener frutos con unas características de madurez óptimas tanto para el consumo como para su frigo-conservación, de forma que lleguen con las mejores condiciones organolépticas posibles al usuario final, se debe disponer de índices para determinar el momento óptimo de recolección. Los índices más utilizados son el color de fondo (pulpa, corteza), la firmeza, el contenido en sólidos solubles, el test de almidón y la acidez valorable, siendo todos

ellos de empleo muy práctico (Knee M et al., 1993).

### III.5.1 Medidas Físico-Químicas.

Los indicadores de calidad físico-químicos pueden ser considerados como tradicionales en el mundo de la fruta. Su aplicación suele ser sencilla y los resultados se obtienen en poco tiempo, aunque su correlación con el grado de maduración y con la calidad según el criterio del consumidor rara vez es completamente satisfactoria. De hecho, suele ser necesario utilizar varios de ellos conjuntamente para poder garantizar un control adecuado de la calidad de la fruta analizada. Los indicadores físico-químicos utilizados en este trabajo son la firmeza, la acidez, la colorimetría y la medición de sólidos solubles. Salvo la colorimetría, todos ellos requieren la destrucción de la muestra (Brezmes, 2001).

#### III.5.1.1 Calibre y peso.

El tamaño del fruto, es decir, su calibre es obligatoria para poder realizar su comercialización. La fruta se selecciona y se separa según su calibre (peso, diámetro) para su puesta a la venta. Los datos de calibre se toman con un calibre digital. Los calibres comerciales para pomelo y mandarina se muestran en las tablas III.1 y III.2, respectivamente.

Calibre	Diámetro(mm)
00	139 o más
01	109-139
02	100-119
03	93-110
04	88-102
05	84-102



06	81-93
07	77-89
08	73-85
09	70-80

Tabla III.1 Relación de calibres comerciales de pomelo según los estándares de la unión europea. Fuente: Aprifel, 2020.

Calibre	Diámetro(mm)
1XXX	> 78
1XX	67-78
1-1X	63-74
2	58-69
3	54-64
4	50-60
5	46-56
6	43-52

Tabla III.2 Relación de calibres comerciales de mandarina según la unión europea. Fuente: Reglamento (CE) n° 1799/2001

La determinación de peso medio se calcula apartir de la suma de los pesos unitarios divididos por el número total de los frutos. Para la determinación del peso fresco de los frutos se emplea una balanza, en este caso, de la marca KERN (Figura III.17), con una sensibilidad de 0.01 g. Los datos, expresados en gramos, se anotan con dos cifras decimales.



*Figura III.17 Balanza marca KERN para determinación de pesos de los frutos. Fuente: Femto.es*

### III.5.1.2 Firmeza

La firmeza es una de las técnicas más utilizadas en el control de la maduración de la fruta. El instrumento que se utiliza para aplicar esta técnica es el penetrómetro (Figura III.18) Se trata de una herramienta de un tamaño reducido que permite hacer mediciones en campo con facilidad. La firmeza es uno de los métodos físico-químicos que mejor se correlaciona con el estado de maduración de la fruta, siendo especialmente importantes en frutales de hueso, ya que la dureza de la pulpa está directamente relacionada con la madurez de la muestra (Crisosto et al.,1994). Para los ensayos de esta tesis doctoral, se usó el penetrómetro AGROSTA 100 FIELD.



*Figura III.18 Penetrómetro marca AGROSTA. Fuente: propia*

### **III.5.1.3 Análisis de Sólidos Solubles y Acidez.**

Como los azúcares son los componentes mayoritarios en el zumo de la fruta, el análisis de sólidos solubles (CSS) puede utilizarse como un indicador del contenido en azúcares en la muestra (Mitcham et al. 1995). Los azúcares van aumentando a medida que la fruta se desarrolla, midiéndose con un refractómetro (°Brix). Se hace una estimación del porcentaje de azúcar cogiendo una alícuota de zumo, conteniendo más azúcar cuanto más elevados son los °Brix y, en consecuencia, siendo más dulce el fruto. Al igual que en el caso de la medición de los contenidos en sólidos solubles, para medir la acidez de la fruta se coge una alícuota de zumo. En ambos casos usamos la misma técnica, refractometría. En nuestro caso, para realizar las medidas hemos utilizado un refractómetro digital marca ATAGO, modelo PAL BX/ACID1 (Figura III.19).



*Figura III.19 Refractómetro digital ATAGO. Fuente: Propia*

### **III.5.1.4 Colorimetría**

La colorimetría es el único de los métodos físico-químicos que no requiere la destrucción de la muestra. Para realizar la medición se utiliza un colorímetro. La función del colorímetro es describir la coloración de la epidermis de la pieza de fruta objeto de la medición. Para ello se miden tres parámetros,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . La luminosidad viene descrita por  $L^*$ . El color negro presenta una luminosidad de 0 mientras que el blanco presenta una luminosidad de 100. Los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  se utilizan para evaluar la saturación y el tono. La saturación nos da la pureza de un color y el tono es el color propiamente dicho (Brezmes, 2001). En esta tesis

doctoral, se utilizó un colorímetro de la marca Minolta CR-410 (Figura III.20).



*Figura III. 100 Colorímetro Minolta CR-410. Fuente: Minolta.es*

**CAPÍTULO IV.**

**APARTADOS QUE  
CONSTITUYEN LA TESIS  
DOCTORAL**



## ***APARTADO N°1. “Determinación del índice de estrés hídrico por termometría infrarroja (CWSI) en pomelos regados con agua regenerada combinado con riego deficitario controlado”***

### **Resumen**

El agua no siempre se encuentra accesible para la agricultura debido a su escasez. Con el fin de desarrollar con éxito estrategias de riego que optimicen la productividad del agua, el estado de la misma en la planta es fundamental.

Para ello, evaluamos la idoneidad de los indicadores térmicos por termometría infrarroja (IRT) para determinar el estado hídrico de un cultivo en auge en la Región de Murcia, como es el cultivo del pomelo, en una finca comercial con riego localizado, utilizando agua regenerada (AR) y riego deficitario controlado (RDC) a largo plazo. Los resultados mostraron que las diferencias  $T_c - T_a$  ( $T^a_{\text{dosel vegetal}} - T^a_{\text{aire}}$ ) fueron positivas en un amplio rango de déficits de presión de vapor (DPV) y los mayores valores de  $T_c - T_a$  se encontraron a las 10.00 GMT, antes y después de que se alcanzaran los valores diarios más altos de DPV y radiación solar ( $R_s$ ). Además, evaluamos las relaciones entre  $T_c - T_a$  y el DPV para establecer las líneas de base sin estrés hídrico (NWSB), que son necesarias para calcular con precisión el índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI).

Se encontraron dos conclusiones importantes, que i) Las correlaciones más significativas ( $p < 0.005$ ) se encontraron a las 10.00 GMT y sus pendientes fueron positivas, y ii) Las NWSB mostraron una marcada variación horaria y estacional, debido principalmente por la variación de la radiación solar, ya que tanto la pendiente de las NWSB como el intercepto de las NWSB estaban significativamente correlacionados con el ángulo solar cenital ( $\theta Z$ ) ( $p < 0.005$ ).

El intercepto fue mayor cuando  $\theta Z$  estaba cerca de 0 (al mediodía) y la pendiente mostraba una marcada histéresis a lo largo del día, aumentando por la mañana y disminuyendo por la tarde.



La determinación de las NWSB, según la estación del año mejoró la mayoría de sus coeficientes de correlación. Además, la relación significativa de  $T_c - T_a$  frente al DPV fue mayor en el periodo en el que el intercepto y  $T_c - T_a$  fueron bajos. El CWSI fue el indicador térmico que mostró el mayor nivel de acuerdo con el potencial hídrico del tallo de los diferentes tratamientos, aunque  $T_c$  y  $T_c - T_a$  también estuvieron significativamente correlacionados. Destacamos la idoneidad de los indicadores térmicos medidos por IRT para determinar el estado hídrico de pomelos en condiciones de salinidad (AR) y estrés hídrico (RDC).

## **Introducción y Objetivos**

Los indicadores tradicionales de estrés hídrico utilizados en los árboles, como el potencial hídrico ( $\Psi$ ) o la conductancia estomática ( $g_s$ ) consumen mucho tiempo, deben realizarse manualmente y proporcionan mediciones puntuales que incluyen una única localización del suelo, una hoja, una rama o un árbol. Tienen limitaciones para representar el estado hídrico de toda una plantación y no son económicamente viables debido al elevado número de puntos de control necesarios.

Es por ello que se recomienda la búsqueda de métodos alternativos que utilicen técnicas de teledetección y sean menos laboriosos y susceptibles a la automatización para su uso en fincas comerciales (Ballester et al., 2013). La teledetección adquiere una importancia especial en este contexto, ya que permite un mejor seguimiento de las grandes superficies cultivadas que facilita la evaluación de la gestión precisa del estrés hídrico de la planta. Esto ha sido ampliamente señalado en la literatura como un factor clave para asegurar el éxito de las estrategias de ahorro de agua basadas en el riego de las plantas por debajo de sus necesidades hídricas totales (Ballester et al., 2018).

En este sentido, las mediciones de la temperatura del dosel ( $T_c$ ) por termometría infrarroja (IRT) como indicador del estrés hídrico se están utilizando cada vez más. Los sensores infrarrojos de temperatura a distancia proporcionan un medio sin contacto para medir la temperatura superficial de las plantas. Este

método permite medir grandes superficies para detectar la temperatura de las hojas de las plantas de forma continua. Puede ser manualmente (Jackson et al., 1981) o utilizarse a distancia y montarse en un mástil o una grúa (Testi et al., 2008; Wang et al., 2010) sobre una plataforma aérea (Berni et al., 2009) o en un satélite (Barbagallo et al., 2008). En la actualidad, son relativamente rápidos y baratos, fácilmente automatizables y pueden instalarse permanentemente en los campos.

La temperatura del dosel obtenida mediante IRT y sus indicadores térmicos relacionados, como el Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI) y el Índice de Conductancia Estomática ( $I_g$ ) han sido conocidos por ser un proxy simple y rentable para monitorear el estado hídrico de los cultivos durante muchos años (Jackson et al., 1981; Idso et al., 1978).

El CWSI se basa en la relación entre la  $T_c$  real y los valores teóricos de la  $T_c$  bajo dos condiciones límite, que dependen del déficit de presión de vapor (DPV), incluyendo un límite inferior cuando la planta transpira a su máxima velocidad (árboles bien regados con los estomas totalmente abiertos) y un límite superior cuando no hay transpiración (árbol en condiciones de máximo estrés hídrico y estomas completamente cerrados). El límite inferior se describe mediante una regresión lineal entre  $T_c - T_a$  y DPV, que se conoce como línea de base sin estrés hídrico (NWSB). El método ampliamente utilizado para definir el límite superior es el propuesto por (Idso et al., 1981), que utiliza una línea horizontal que parte de la intercepción de la NWSB corregida por la temperatura del aire. Estas líneas de base empírica utilizadas para calcular el índice, especialmente el NWSB, son estables bajo las condiciones ambientales esperadas durante la temporada de riego. Si se encuentra inestabilidad, la variación de la línea de base debería ser predecible. Por lo tanto, los errores en el CWSI pueden minimizarse. Además, las condiciones meteorológicas secas y estables son deseables para evitar importantes errores en la definición del CWSI.

En cítricos, se ha demostrado que la temperatura del dosel puede utilizarse para detectar el estrés hídrico de la planta (Ballester et al., 2013; Zarco-Tejada et al., 2012). Sin embargo, se sabe que los cítricos son sensibles a la presión de vapor del aire, que reduce la transpiración en condiciones de alto DPV (Romero-



Trigueros et al., 2014a) y dificulta el uso de este método en tales condiciones (Ballester et al., 2013).

El concepto de CWSI se ha aplicado en muchos estudios para detectar el estrés hídrico, sobre todo en cultivos anuales y más recientemente en cultivos leñosos (González-Dugo et al., 2013; González-Dugo et al., 2014; García-Tejero et al., 2018). Sin embargo, pocos estudios han utilizado el CWSI para evaluar estrés salino (Gómez-Bellot et al., 2015). En los cultivos de cítricos, según nuestro conocimiento, sólo hay dos trabajos publicados sobre el uso del CWSI bajo estrés hídrico, uno en lima dulce (Sepaskhah et al., 1995) y otro en naranjas y mandarinas (González-Dugo et al., 2014).

Sin embargo, no se ha publicado nada sobre el cultivo del pomelo. Por lo tanto, sería necesario seguir investigando en este campo, dada la utilidad potencial del CWSI para aplicaciones de teledetección. La hipótesis de este apartado es que el uso de la  $T_c$  medida por IRT y su derivado índice CWSI puede ser útil para evaluar tanto el estrés hídrico como el estrés salino de los pomelos regados con AR y RDC. Con el fin de verificar esta hipótesis y mejorar el conocimiento sobre el uso de las NWSB para calcular el CWSI en cítricos, más concretamente en pomelo, este trabajo pretende i) Evaluar las oscilaciones diurnas de  $T_c$  y  $T_c - T_a$  medidas por termometría en árboles sometidos a largo tiempo de estrés hídrico y salino, ii) Establecer la línea de base sin estrés hídrico (NWSB), así como sus períodos temporales diurnos y estacionales, y iii) Evaluar la idoneidad del índice derivado CWSI y definir el indicador térmico más adecuado ( $T_c$ ,  $T_c - T_a$ , CWSI) correlacionado con el estado hídrico de la planta considerando su tratamiento de riego.

## Materiales y Métodos

### Área experimental y tratamientos de riego.

El ensayo tuvo lugar en 2017 en una finca comercial de cítricos, situada al noroeste de la Región de Murcia (Capítulo III), con pomelos 'Star Ruby' (*Citrus paradisi Macf*) injertados sobre portainjerto *Macrophylla* (*Citrus macrophylla*). La parcela experimental se regó con dos fuentes de agua de calidad distinta desde 2007 (**AT** y **AR**) (Tabla IV.1) y el riego se programó en función de la evapotranspiración diaria del cultivo ( $ET_c$ ), siendo los tratamientos establecidos: **AT-C**; **AR-C**; **AT-RDC** y **AR-RDC**, descrito en el capítulo III.

**Tabla IV.1.** Propiedades físico-químicas del agua del trasvase Tajo-Segura y del agua regenerada en 2017. Los valores son medias  $\pm$  DE de 12 muestras individuales tomadas a lo largo del ciclo de cultivo. CE: conductividad eléctrica ( $dS \cdot m^{-1}$ ); AT: agua de trasvase; AR: agua regenerada.

Parámetros	Unidades	AT	AR
CE	$dS \cdot m^{-1}$	$1.32 \pm 0.38$	$3.97 \pm 1.07$
pH		$8.33 \pm 0.16$	$7.90 \pm 0.18$
Ca	$meq \cdot L^{-1}$	$4.49 \pm 1.15$	$7.84 \pm 2.52$
Mg	$meq \cdot L^{-1}$	$4.69 \pm 1.65$	$10.53 \pm 4.21$
K	$mg \cdot L^{-1}$	$0.16 \pm 0.07$	$0.99 \pm 0.20$
Na	$meq \cdot L^{-1}$	$4.95 \pm 2.78$	$21.00 \pm 6.75$
B	$mg \cdot L^{-1}$	$0.13 \pm 0.09$	$0.79 \pm 0.34$
Cl <sup>-</sup>	$meq \cdot L^{-1}$	$3.75 \pm 2.04$	$18.98 \pm 5.83$
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$mg \cdot L^{-1}$	$3.88 \pm 1.91$	$9.54 \pm 6.51$
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	$mg \cdot L^{-1}$	$1.00 \pm 0.00$	$1.37 \pm 0.69$
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	$meq \cdot L^{-1}$	$5.44 \pm 2.52$	$15.55 \pm 6.99$

El período del ensayo coincidió con el tiempo de aplicación del RDC y abarcó desde el DOY 193 hasta el DOY 257. Debido a la dependencia que tienen las NWSBs del clima, para una mejor comprensión de los datos, la duración del



ensayo se dividió en tres subperíodos: el período 1 (P1, DOY 193-212), el período 2 (P2, 213- 239), y el Período 3 (P3, 240-257) en función de los cambios en los parámetros de  $R_s$  y DPV, que son los más influyentes en las NWSBs. Los valores de  $R_s$  y DPV fueron bastante similares dentro de cada subperíodo. Los valores medios fueron 312, 267 y 218  $W \cdot m^{-2}$  para  $R_s$  y 1.9, 1.6 y 1.3 kPa para DPV en cada periodo, respectivamente. Ambos parámetros disminuyeron a lo largo del experimento.

### **Recogida de datos en el campo**

El potencial hídrico del tallo ( $\Psi_s$ ) se determinó al mediodía solar cada 15 días en ocho hojas completamente sanas de la zona media del tallo por tratamiento (una hoja por árbol y réplica), utilizando una cámara de presión (Soil Moisture Equipment Corp. (modelo 3000, California, USA), en hojas cercanas al tronco, que habían sido embolsadas dentro de sobres de aluminio al menos 2 horas antes de la medición (Shackel et al., 1997).

Las temperaturas del dosel se midieron continuamente mediante termometría. Los sensores de temperatura infrarrojos (IRTs) (Apogee instruments, Utah, EE.UU., modelo SIF-111) se montaron sobre un árbol representativo por réplica para capturar la temperatura del dosel de forma continua. Los sensores tenían un campo de visión angular de  $22^\circ$  (medio ángulo) y la precisión en el rango calibrado era de  $\pm 0.2$  °C. Se asumió un valor de 0.96 de la emisividad para calcular la  $T_c$ . Cada sensor se montó en mástiles de aluminio con un brazo de montaje horizontal que terminaba sobre el centro de la copa. Para minimizar los efectos de la radiación solar, los sensores se protegieron con un escudo solar de PVC (modelo IR-SS, Campbell Scientific Ltd., Shepshed, Reino Unido).

Los IRTs se instalaron para apuntar verticalmente hacia abajo (vista nadir) apuntando al centro de la copa desde una distancia de aproximadamente 0.5 m sobre la de la copa del árbol. La densa copa de los pomelos, cuya superficie oscilaba aproximadamente entre 7 y 9  $m^2$  dependiendo del tratamiento de riego, permitió

a los IRTs ver sólo el follaje en un área circular de aproximadamente 0.13 m<sup>2</sup> en la parte superior de la copa. Los sensores se conectaron a registradores de datos (modelo CR1000, Campbell Scientific Ltd., Shepshed, Reino Unido), que registraron la  $T_c$  cada minuto y almacenaron la media cada 15 minutos. Las mediciones de la temperatura del dosel comenzaron el 12 de julio de 2017 (DOY 193) y continuaron hasta el 14 de septiembre (DOY 257).

La temperatura del aire ( $T_a$ ), junto con los datos de DPV se registraron en la finca cada 15 min con una estación meteorológica Campbell (Campbell Scientific Ltd., Shepshed, REINO UNIDO).

El CWSI se calculó con una metodología empírica de la siguiente manera (Idso et al., 1981):

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}}$$

donde  $T_c - T_a$  es la diferencia de temperatura medida entre el dosel y el aire.  $(T_c - T_a)_{LL}$  es el límite inferior de  $(T_c - T_a)$  para un determinado déficit de presión de vapor (DPV), que equivale a una cubierta que transpira a la tasa potencial, y  $(T_c - T_a)_{UL}$  es el límite máximo de  $(T_c - T_a)$ , que corresponde a un dosel en el que la transpiración se detiene por completo. La relación entre  $T_c - T_a$  y DPV para los árboles control totalmente regados con agua del trasvase (AT-CT) se utilizó para establecer la línea de base sin estrés hídrico (NWSB), que define el límite inferior  $(T_c - T_a)_{LL}$  para una demanda evaporativa dada. Por lo tanto,  $(T_c - T_a)_{LL}$  es una función lineal del DPV que, una vez obtenida empíricamente, se calcula resolviendo la ecuación de referencia (NWSB) para la DPV real.  $(T_c - T_a)_{UL}$  es un valor fijo relacionado con  $T_a$  (Cohen et al., 2005). Específicamente, en nuestro



experimento, UL se definió como  $T_{a+4}$ , que es un valor adaptado de la lima (Sepaskhah et al., 1995), de la naranja y la mandarina (González-Dugo et al., 2014).

De todo el periodo de estudio, sólo se seleccionaron los días sin nubes desde mediados de julio a mediados de septiembre para el cálculo del CWSI y para la determinación del NWSB. También se descartaron los días de cielo despejado que seguían a un evento de lluvia para evitar errores asociados con el follaje húmedo (Egea et al., 2017). Dependiendo de las condiciones atmosféricas, del cultivo y del agua del suelo, a veces es posible medir valores de  $T_c$  superiores a la línea de base superior, por lo tanto, el CWSI puede ser ligeramente superior a 1 (De Jongea et al., 2015).

### **Diseño experimental y análisis estadístico**

En este estudio se utilizaron un total de 192 árboles. El diseño experimental de cada tratamiento de riego fue de 4 repeticiones distribuidas siguiendo un diseño completamente aleatorio. Cada repetición constaba de 12 árboles, organizada en 3 filas adyacentes. Dos árboles de la fila central de cada réplica se utilizaron para las mediciones y el resto actuaron como bordes y se excluyeron del estudio para eliminar los efectos potenciales de los mismos.

Se determinó el coeficiente de variaciones  $C_v$ , (la relación entre la desviación estándar y la media) de la temperatura del dosel medida por los IRT para cada tratamiento.

Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) ponderado, seguido de la prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) para evaluar las diferencias entre tratamientos. Se calcularon regresiones lineales entre las variables medidas en el campo y los datos espectrales. Se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson para evaluar la significación de estas relaciones. Estos análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS (vers. 23.0 para Windows, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

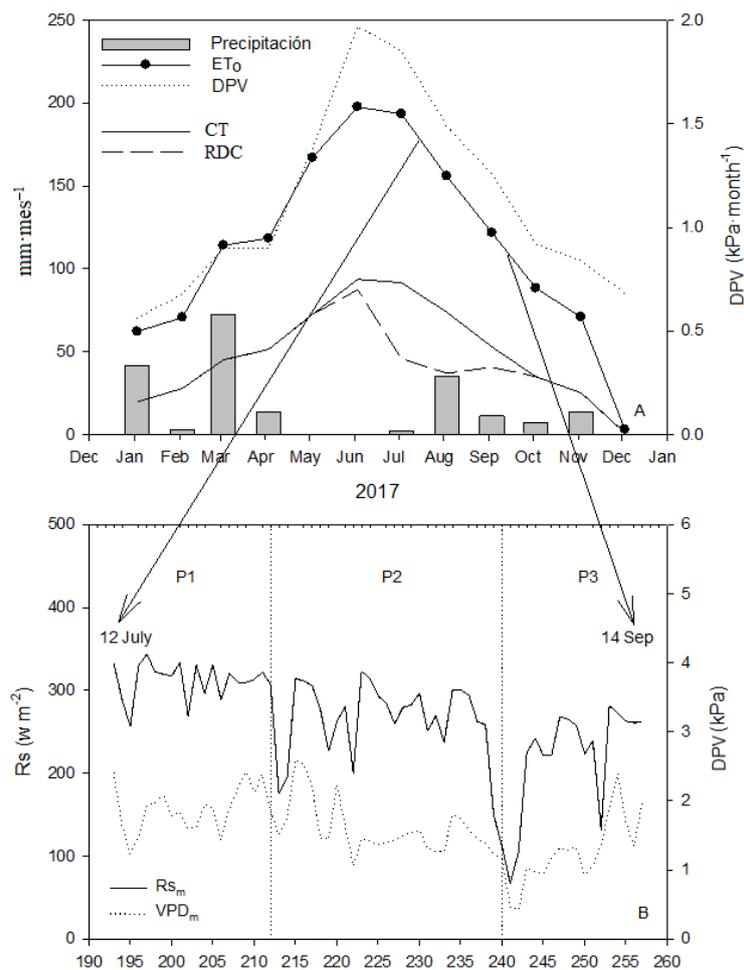
## Resultados y discusión

### Parámetros climáticos y análisis de la variabilidad estacional de la $T_c$ por IRT.

El grado de variación de la temperatura del dosel ( $T_c$ ) medido por sensores infrarrojos (IRTs) entre los árboles de un mismo tratamiento de riego no es algo generalmente conocido (González-Dugo et al., 2013). Para caracterizar dicha variabilidad, se determinó el coeficiente de variación ( $C_v$ ) de la  $T_c$  para cada tratamiento. El  $C_v$  de las lecturas de  $T_c$  de los diferentes IRT (mediciones a intervalos de 15 minutos) fueron de 0.38%, 0.56%, 0.55% y 1.65% para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente. En AR-RDC, cerca del 92.6% de los datos mostraron un  $C_v$  inferior al 5% y cerca del 70% de los datos de menos del 2%. Este elevado  $C_v$  se debió a problemas de humedad en el interior del sensor en los días de lluvia. Para el cálculo de la NWSB, estos datos no se tuvieron en cuenta. En el resto de los tratamientos, aproximadamente el 99.59%, el 94.85% y el 96.30% de los datos totales tenían un  $C_v$  inferior al 2%. Por lo tanto, el bajo  $C_v$  de  $T_c$  mostró una pequeña variación entre los árboles del mismo tratamiento. También se demostró que la superficie de la copa, es decir, la superficie del dosel vista por el sensor (o el número de hojas que caen dentro del campo de visión del sensor) era suficiente para eliminar la variabilidad debida a la orientación de las hojas con respecto al ángulo del sol.



**Figura IV.1** (A) Evolución estacional de la precipitación ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ), CT y RDC ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ), evapotranspiración de referencia ( $\text{ET}_0$ ,  $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ) y déficit de presión de vapor (DPV,  $\text{kPa}\cdot\text{mes}^{-1}$ ) durante 2017. (B) Media diaria de DPV y radiación solar ( $R_s$ ,  $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ ) durante el periodo experimental (de DOY 193 a 257 del año 2017). Las líneas verticales discontinuas dividen el periodo experimental en tres periodos con diferente nivel de estrés hídrico: Periodo 1 (P1, DOY 193-212), Periodo 2 (P2, DOY 213-239) y Periodo 3 (P3, DOY 240-257).



### Patrones de Curso Diurno de las Oscilaciones de $T_c$ y $T_c-T_a$ medidas mediante IRT

En la figura IV.2, se muestra la tendencia horaria de  $T_c$  y  $R_s$  y  $T_c-T_a$  y DPV para todos los tratamientos en tres momentos diferentes del periodo de RDC,

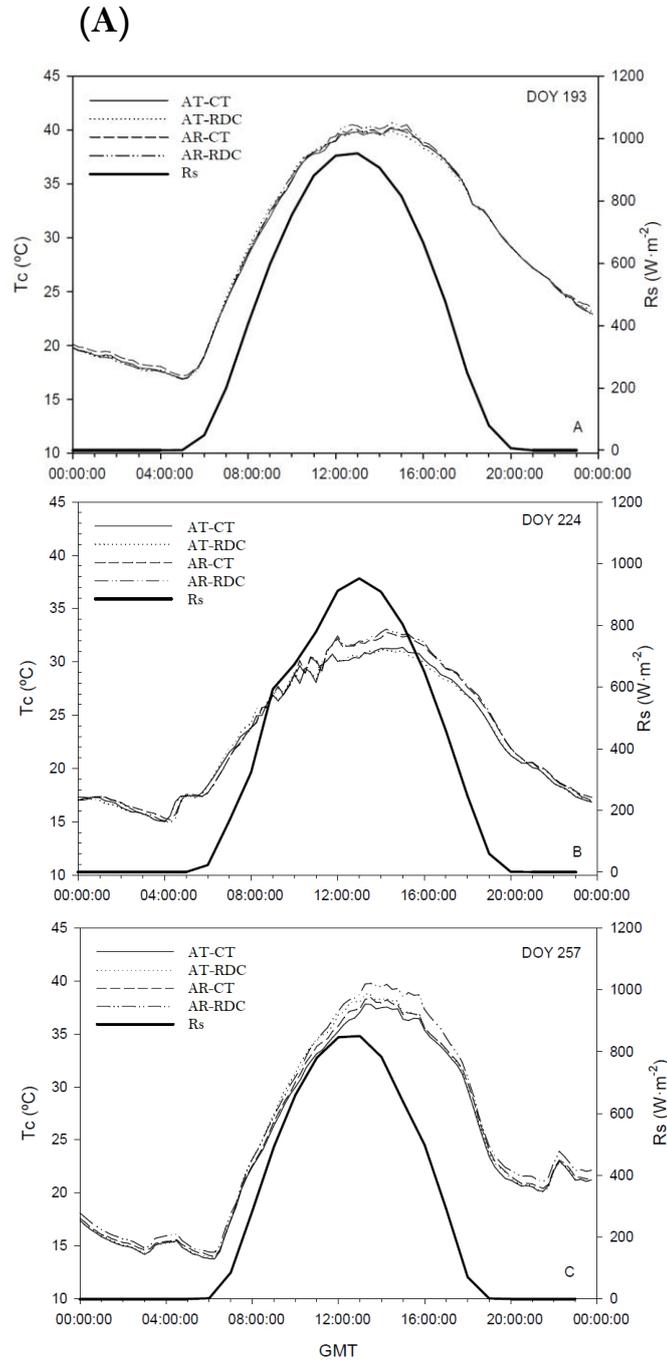
incluyendo al principio (DOY 193, tras 9 días con RDC), medio (DOY 224, tras 40 días), y al final (DOY 257, tras 72 días) con el fin de comprender el comportamiento de dichos parámetros a diferentes niveles de estrés hídrico.

En general,  $T_c$  mostró grandes oscilaciones alrededor de las 12.00-16.00 GMT en los DOY 193 y 257 y a las 09.00-16.00 del DOY 224 cuando la DPV era menor. Las oscilaciones variaron más de 1 °C en 30 minutos. Las diferencias entre los tratamientos aumentaron a medida que avanzaba el día y, en general, desaparecieron alrededor de las 18:00 GMT en los DOY 193 y 257 y a las 20:00 GMT en DOY 224, como resultado de la disminución en la demanda evaporativa y en  $R_s$ . Las mayores diferencias de  $T_c$  entre los tratamientos se detectaron notablemente en las lecturas tomadas 12.00 y las 17.00 GMT. Al inicio del periodo de RDC (DOY 193), los tratamientos no mostraron diferencias significativas de  $T_c$  ya que los tratamientos RDC sólo habían sido sometidos a una semana de riego deficitario. En los periodos de RDC medio y final (DOYs 224 y 257), las diferencias entre los árboles control y estresados se hicieron significativas. La máxima diferencia entre las temperaturas del dosel de los tratamientos fue de 6.85 °C registrada en el DOY 256 para AR-RDC con respecto a AT-CT, cuatro días antes del final del periodo de estrés de RDC (datos no mostrados).

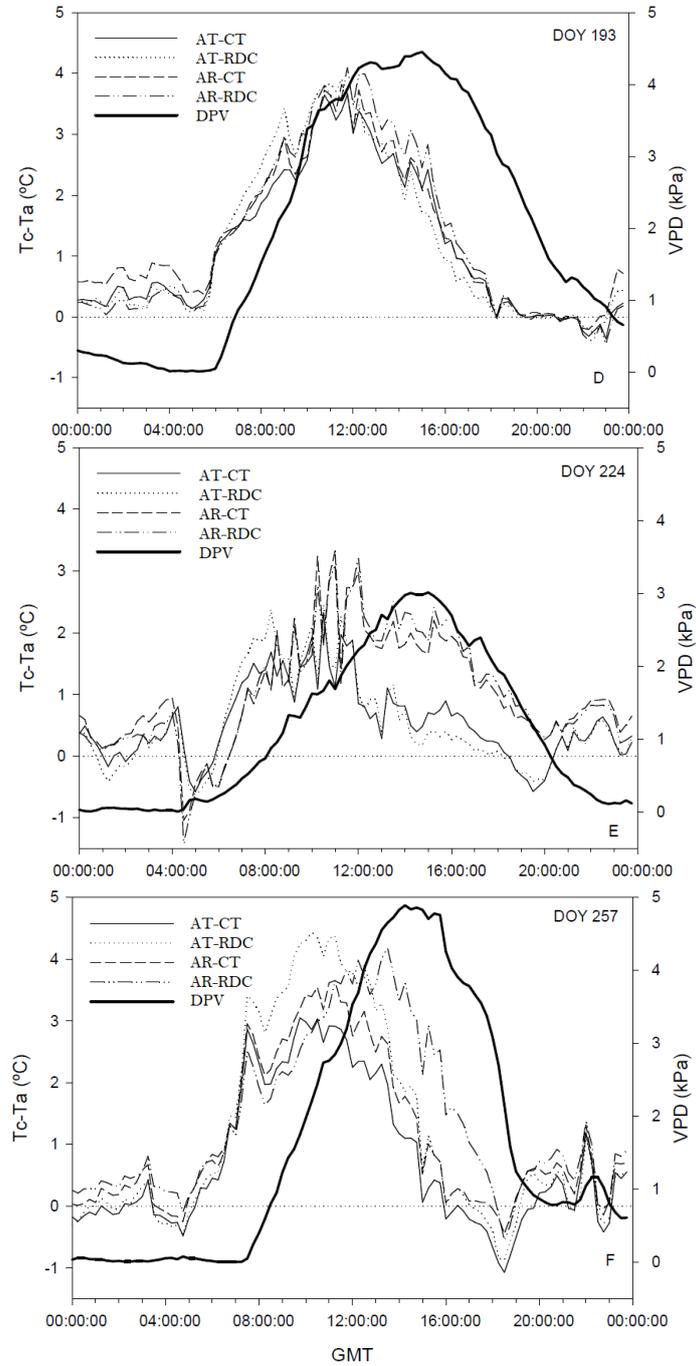
Los valores de  $T_c$  fueron superiores a la temperatura del aire ( $T_a$ ) aproximadamente desde las 5.00 GMT hasta las 18.00 GMT (el dosel estaba más caliente que el aire) y, por lo tanto, los valores de la diferencia  $T_c-T_a$  fueron superiores a 0 °C. Sin embargo, por la tarde y por la noche, a veces los valores de  $T_c-T_a$  se volvieron negativos en todos los tratamientos, siendo las copas de los árboles totalmente regadas más frías en algunas ocasiones que las de los tratamientos de estrés y, en consecuencia, siendo sus valores de  $T_c-T_a$  los más negativos. Los promedios diarios de  $T_c-T_a$  fueron de 0.71, 0.79, 0.96 y 1.01 °C para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente. Así, los tratamientos RDC y AR tuvieron valores de  $T_c-T_a$  más altos que los árboles del control durante el periodo de experimentación. En todos los tratamientos, los valores máximos de  $T_c-T_a$  se alcanzaron antes y después de los picos de DPV y  $R_s$ , respectivamente. El tratamiento AR-RDC mostró el máximo de  $T_c-T_a$  registrado durante el experimento (7.65 °C en DOY 211) (datos no mostrados) 37 días después del inicio del periodo RDC, que coincide con un día de alto DPV.



**Figura IV.2.** Patrones representativos del curso diario de la temperatura del dosel,  $T_c$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y evolución de la radiación solar,  $R_s$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (columna A) y patrones representativos del curso diario de  $T_c-T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y evolución de DPV (kPa) (columna B) para cada tratamiento: AT-CT (control agua de trasvase), AT-RDC (riego deficitario controlado agua de trasvase), AR-CT (control agua regenerada) y AR-RDC (riego deficitario controlado agua regenerada) en tres días que diferían en el estado hídrico del árbol: DOY 193, 224 y 257 en 2017. Cada lectura de  $T_c$  correspondió al valor medio de cuatro árboles del mismo tratamiento.



(B)



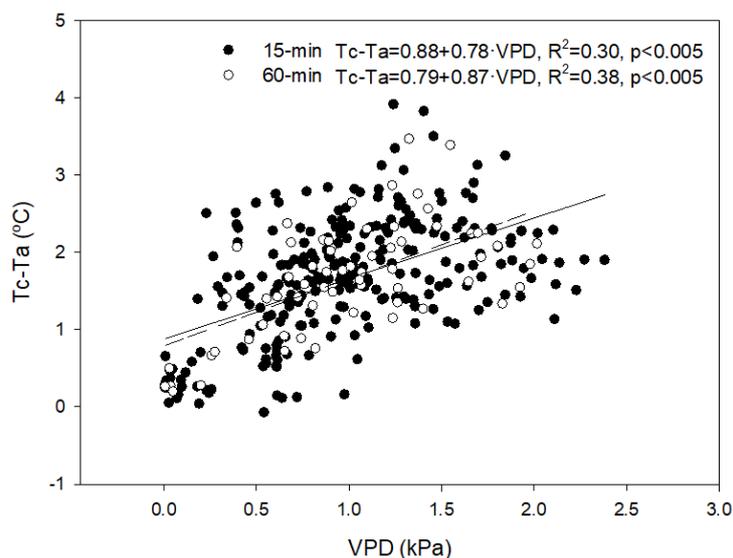


## **Establecimiento de la línea de base sin estrés hídrico (NWSB) con $T_c$ medido por termometría**

El primer intento de obtener la línea de base sin estrés hídrico (NWSB) agrupó todos los datos de  $T_c-T_a$  y DPV de días sin nubes de los árboles completamente regados con AT, pero los datos obtenidos estaban demasiado dispersos, lo que hace imposible obtener una línea de base  $(T_c-T_a)_{LL}$  razonable (datos no mostrados).

Para definir con precisión la NWSB, evaluamos los datos de diferentes maneras. En primer lugar, para encontrar el intervalo de tiempo óptimo para el establecimiento del NWSB, promediamos los valores de  $T_c-T_a$  en diferentes intervalos de tiempo, que oscilaban entre 30-45-60 min. Es conveniente recordar que las lecturas de  $T_c$  fueron recogidas por los IRT cada 15 minutos. El mejor ajuste se mostró para los promedios de  $T_c-T_a$  de 60 minutos. En la Figura IV.3 se muestran, a modo de ejemplo, las dos regresiones lineales obtenidas para árboles totalmente regados (AT-CT) a las 08.00 GMT. Las pruebas realizadas en los demás conjuntos de datos mostraron resultados muy similares. Así, para todos los análisis de termometría posteriores, se utilizaron los promedios de  $T_c-T_a$  y DPV de 60 minutos.

**Figura IV.3.** Ejemplo de relación entre  $T_c-T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y DPV (kPa), utilizando lecturas de 15 minutos y promedios de 60 minutos obtenidas a las 8.00 GMT para árboles de riego completo (AT-CT) durante el periodo experimental en 2017. La línea continua y la línea discontinua corresponden a regresiones lineales para lecturas de 15 minutos y para promedios de 60 minutos, respectivamente.



A continuación, se determinaron las NWSBs para las diferentes horas del día. Las relaciones  $T_c-T_a$  frente al DPV fueron significativas ( $p < 0.005$ ) para cada hora (Tabla IV.2). Encontramos cambios en los parámetros de la NWSB a lo largo del período diurno. Los coeficientes de correlación ( $R$ ) mostraron valores moderados, que oscilaron entre 0.72-0.38 y se vieron notablemente afectados por dicho período. El valor  $R$  más alto se encontró a primera hora de la mañana ( $R=0.72$  a las 08.00 GMT) y disminuyó gradualmente hasta 0.38 a las 17.00 GMT. La pendiente y los interceptos de las NWSBs ajustados también variaron a lo largo del día. Las pendientes disminuyeron progresivamente desde  $+1.12$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{kPa}^{-1}$  a las 08.00 GMT a  $+0.14$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{kPa}^{-1}$  a las 17.00 GMT. El intercepto mostró una tendencia similar, aunque fue menos lineal con un valor máximo de  $+0.61$   $^{\circ}\text{C}$  a las 08.00 GMT y un valor mínimo de  $+0.08$   $^{\circ}\text{C}$  a las 17.00 GMT. Se puede observar que ambos parámetros ajustados disminuyeron unas 8 veces a lo largo de tiempo. Los valores máximos de  $T_c-T_a$  se recogieron antes de que el DPV y el ángulo solar cenital ( $\theta Z$ ) alcanzaran sus valores máximos y mínimos, respectivamente (Tabla IV.2).



**Tabla IV.2** Correlaciones horarias significativas entre  $T_c-T_a$  y DPV utilizando los días del año sin nubes (DOY) 193-257 para la línea de base sin estrés hídrico (NSWB). GMT: hora media de Greenwich. DPV: déficit de presión de vapor.  $\theta Z$ : ángulo solar cenital. El sufijo <sub>av</sub> indica la media. Cada valor se obtiene a partir de la media horaria de  $T_c-T_a$  y DPV en un día y una hora determinados, utilizando la  $T_c$  de los árboles regados completamente (AT-CT). El número de puntos para cada regresión fue de 53. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre horas (GMT) según ANCOVA ( $P < 0,01$ ).

Hora (GMT)	Pendiente ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{kPa}^{-1}$ )	Intercepto ( $^{\circ}\text{C}$ )	R	P	DPV <sub>av</sub> (kPa)	$(T_c-T_a)_{av}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\theta Z$ ( $^{\circ}$ )
08.00	1.12a	0.61a	0.72	<0.005	1.00	1.64	59.79
09.00	0.84ab	0.54bc	0.71	<0.005	1.53	1.83	48.32
10.00	0.74bc	0.61c	0.70	<0.005	1.96	2.04	37.64
11.00	0.54bcd	0.56d	0.55	<0.005	2.36	1.90	28.90
12.00	0.44de	0.44ef	0.52	<0.005	2.70	1.73	24.54
13.00	0.38ef	0.36f	0.49	<0.005	2.93	1.47	27.08
14.00	0.32efg	0.22gh	0.47	<0.005	2.93	1.14	34.96
15.00	0.23fg	0.28h	0.34	<0.005	2.79	0.92	45.32
16.00	0.21fg	0.11i	0.40	<0.005	2.55	0.62	56.69
17.00	0.14g	0.08j	0.38	<0.005	2.16	0.32	68.42

Para estudiar si existía un efecto estacional en los datos, además del efecto horario en los parámetros ajustados de las NSWBs observados en la Tabla IV.2, el periodo del experimento desde el DOY 193 hasta el 257 se dividió en 3 grupos basados en la radiación solar y los niveles de DPV. El periodo 1 (P1) comprendió desde el DOY 193 hasta el 212. El período 2 (P2) se extendió desde el DOY 213 hasta el 239 y el período 3 (P3) se extendió desde el DOY 240 hasta el 257 (Tabla IV.3). En la tabla IV.3 figuran los parámetros de las ecuaciones de referencia obtenidos en diferentes momentos y periodos.

**Tabla IV.3** Correlaciones horarias entre  $T_c-T_a$  frente al DPV para establecer líneas de base sin estrés hídrico (NSWB) utilizando días sin nubes para diferentes periodos estacionales: Periodo 1 (P1, DOY 193 a 212); Periodo 2 (P2, DOY 213 a 239) y periodo 3 (P3, DOY 240 a 257). GMT: hora media de Greenwich. DPV: Déficit de presión de vapor. Rs: Radiación solar. El sufijo av indica la media. Cada valor se obtiene a partir de la media horaria de  $T_c-T_a$  y DPV en una hora dada de un día dado de cada periodo, utilizando la  $T_c$  de los árboles totalmente regados (AT-CT). El número de puntos para cada regresión fue de 19, 19 y 15 para P1, P2 y P3, respectivamente. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre Tiempos (GMT) según ANCOVA ( $P < 0.01$ )

Time (GMT)	P	Pendiente ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{kPa}^{-1}$ )	Intercepto ( $^{\circ}\text{C}$ )	R	P	DPV <sub>av</sub> (kPa)	$(T_c-T_a)_{av}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Rs <sub>av</sub> ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )
08.00	1	0.90a	0.99a	0.54	<0.01	1.33	1.94	332.99
	2	1.01a	0.56b	0.59	<0.005	0.67	1.38	278.67
	3	0.68a	0.63b	0.64	<0.005	1.24	1.60	195.51
09.00	1	0.60a	1.28a	0.62	<0.005	1.94	2.06	540.70
	2	0.61a	0.57b	0.57	<0.005	1.12	1.56	454.63
	3	0.72a	1.02a	0.51	<0.01	1.93	2.25	360.44
10.00	1	0.53a	1.27a	0.73	<0.005	2.40	2.25	698.79
	2	0.50a	0.71b	0.54	<0.005	1.51	1.79	604.76
	3	0.78a	0.97a	0.62	<0.005	2.38	2.41	520.61
11.00	1	0.32a	1.52a	0.52	<0.01	2.81	2.16	816.05
	2	0.44a	0.31b	0.76	<0.005	1.90	1.62	717.18
	3	0.61a	0.77a	0.60	<0.005	2.76	2.20	627.74
12.00	1	0.11a	2.12a	0.25	ns	3.22	2.14	896.00
	2	0.31ab	0.27b	0.72	<0.005	2.20	1.32	795.53
	3	0.55b	0.46c	0.78	<0.005	3.06	2.00	706.34
13.00	1	-0.03a	2.41a	0.06	ns	3.48	1.96	925.11
	2	0.37b	0.20b	0.75	<0.005	2.39	1.00	841.71
	3	0.38b	0.48c	0.71	<0.005	3.27	1.78	686.48
14.00	1	0.02a	1.87a	0.05	ns	3.46	1.57	885.50
	2	0.18a	0.11b	0.54	<0.005	2.41	0.75	796.73
	3	0.24a	0.46c	0.69	<0.005	3.37	1.27	647.08
15.00	1	0.04a	1.45a	0.14	ns	3.22	1.31	772.09
	2	0.20ab	0.08b	0.62	<0.005	2.31	0.62	679.19
	3	-0.10b	1.09c	0.47	<0.025	3.35	0.75	584.91
16.00	1	-0.13a	1.55a	0.52	<0.01	3.01	0.94	637.68
	2	0.14b	0.05b	0.46	<0.01	2.08	0.38	533.90
	3	-0.19a	0.91c	0.77	<0.005	3.01	0.37	463.22
17.00	1	-0.10ab	0.96a	0.39	<0.05	2.59	0.55	456.58
	2	-0.07b	0.03b	0.35	<0.05	1.72	0.17	347.53
	3	-0.20a	0.51c	0.84	<0.005	2.65	0.03	261.59

Cuando se graficaron la  $T_c-T_a$  y la DPV para una hora del día y un período determinados (Tabla IV.3), no se observó el efecto horario en los coeficientes de correlación entre períodos (Tabla IV.2). La R no mejoró en las primeras horas del día (08.00-9.00 GMT). Sin embargo, aumentó significativamente para las horas centrales del día, de 11.00 a 16.00 GMT, en P2 y P3, que mostraban una radiación solar inferior a la de P1. Para el resto de las horas (10.00 y 16.00-17.00 GMT), el



nivel de acuerdo también mejoró en P1 y P3, mostrando valores de DPV y  $T_c-T_a$  superiores a los valores de P2.

Las pendientes de las NWSBs disminuyeron progresivamente durante el período diurno en general (Tabla IV.3). Por la tarde, algunas pendientes se volvieron negativas, principalmente durante P3. Además, las pendientes fueron más bajas que en la Tabla IV.2, excepto entre las 10.00-12.00 GMT para P3, cuando la pendiente fue la más pronunciada.

En cuanto a los interceptos de la NWSB, para P1 y P3, los valores fueron más altos que cuando todos los días se representaron juntos (Tabla IV.3). Los interceptos de P2 no aumentaron, ya que los niveles de  $T_c-T_a$  eran más bajos que en los otros periodos de estudio (Figura IV.4).

Además, a diferencia de los datos mostrados en la Tabla IV.2, los valores de los interceptos aumentaron hasta un determinado momento del día y luego disminuyeron, principalmente en P1 (los valores máximos de los interceptos fueron 2,41 a las 13.00 GMT en P1, 0,71 a las 10.00 GMT en P2, y 1,02 a las 09.00 GMT en P3) (Tabla IV.3). Los valores más bajos de los interceptos se encontraron a primera hora de la mañana y de la tarde. Encontramos una correlación negativa significativa entre los valores del intercepto y los respectivos coeficientes de correlación de P1, P2 y P3 (Intercepto ( $^{\circ}$ C) =  $-1.78R + 1.85$ ,  $R^2 = 0.35$ ,  $p < 0.005$ ). Por lo tanto, las regresiones lineales  $T_c-T_a$  frente a DPV tenían un mejor coeficiente de correlación cuando el parámetro NWSB-intercepto era menor.

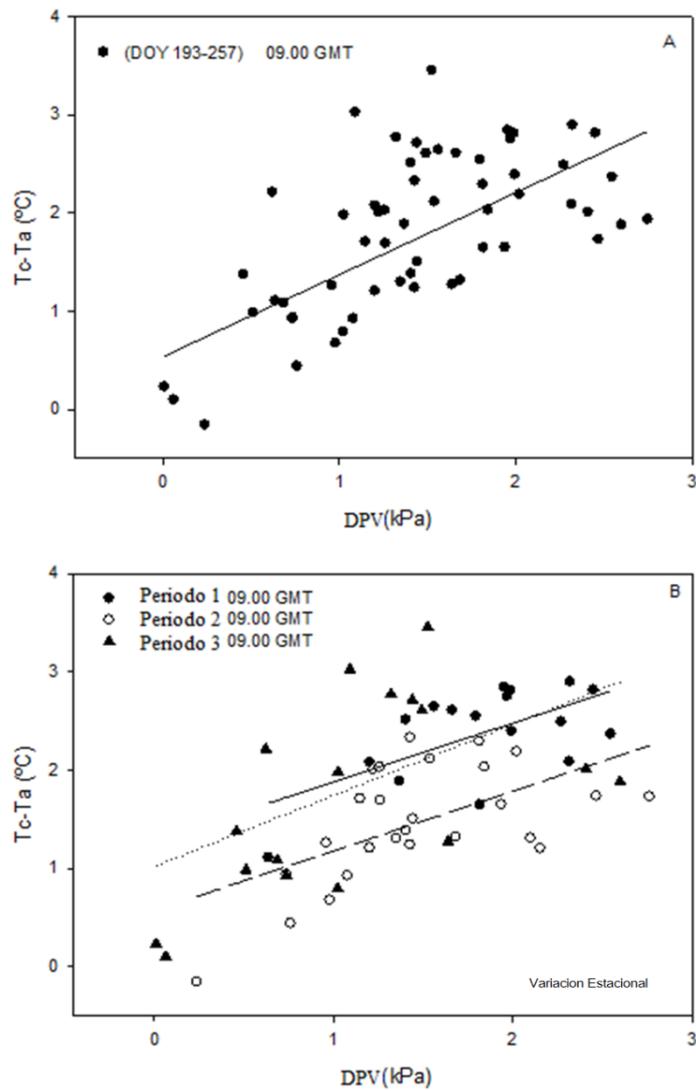
Además, las NWSB derivadas durante los tres periodos de estudio también mostraron una fuerte variación horaria, que puede observarse en el ejemplo de la Figura IV.5. Las pendientes NWSB se modelaron con éxito para el curso temporal diurno con regresiones lineales (Figura IV.6).

Para comprobar si esta variación horaria estaba relacionada con  $R_s$ , se graficaron los parámetros de las ecuaciones de las NWSBs obtenidas para los diferentes periodos contra la  $\theta Z$  (Testi et al., 2008; Egea et al., 2017) (Figura IV.7). La correlación entre los interceptos de las NWSB y  $\theta Z$  fue significativa ( $R^2 = 0.37$ ,

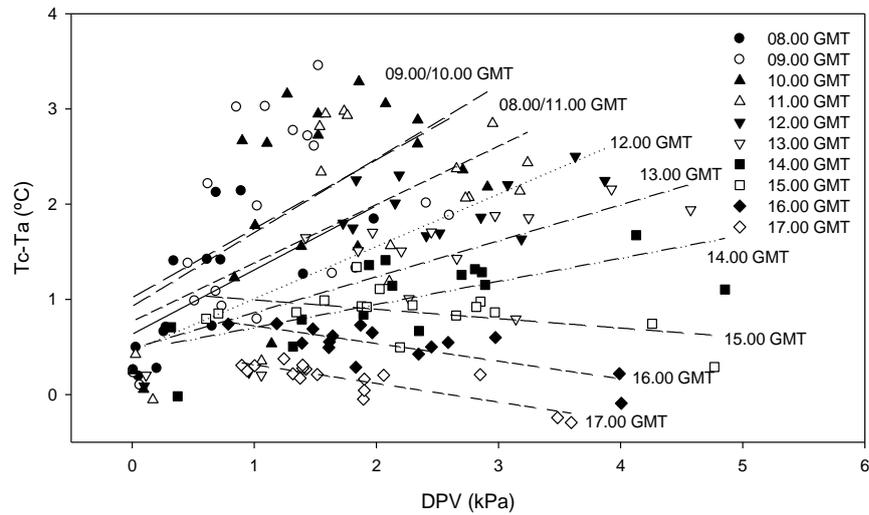
$p < 0.005$ ). Al mediodía, cuando la  $\theta Z$  estaba más cerca de 0, los interceptos eran mayores (Figura IV.7A). Las pendientes de las NWSBs también estaban bien correlacionadas con  $\theta Z$ . Como se describe en la Figura IV.7B, esta relación mostró una marcada histéresis. Hasta el mediodía (08.00-12.00 GMT), las pendientes fueron positivas y aumentaron con  $\theta Z$  ( $R^2 = 0.73$ ,  $p < 0.005$ ). Sin embargo, a partir de las primeras horas de la tarde (13.00-17.00 GMT), las pendientes fueron negativas y disminuyeron al aumentar el ángulo solar ( $R^2 = 0.56$ ,  $p < 0.005$ ). El  $\theta Z$  también estuvo significativamente correlacionado de forma negativa con la diferencia  $T_c - T_a$  ( $T_c - T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) =  $-0.03 \cdot \theta Z$  ( $^{\circ}$ ) +  $2.56$ ,  $R = 0.58$ ,  $p < 0.005$ ). Cuanto mayor es el ángulo cenital, menor es la diferencia de  $T_c - T_a$ .



**Figura IV.4** Variación estacional de las líneas de base sin estrés hídrico (NWSB). Relaciones entre  $T_c - T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y DPV (kPa) con datos del periodo experimental (DOY 193-257) a las 09.00 GMT (A) y datos divididos en tres periodos diferentes: 1 (P1, DOY 193-212), 2 (P2, DOY 213-239) y 3 (P3, DOY 240-257). En los cálculos sólo se utilizaron los días despejados y no lluviosos. Las regresiones lineales se muestran en los tablas IV.2 y IV.3. La línea continua, la línea de guiones largos y la línea de puntos corresponden a las regresiones lineales para P1, P2 y P3, respectivamente.



**Figura IV.5** Variación horaria de las líneas de base sin estrés hídrico (NWSBs). Relaciones entre  $T_c - T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y DPV (kPa) con datos de árboles totalmente regados (AT-CT) en el Periodo 3 (P3, DOY 240-257) de 08.00-17.00 GMT. En los cálculos sólo se utilizaron días de cielo despejado y no lluviosos. Las regresiones lineales se muestran en la Tabla 3.



**Figura IV.6** Mejor ajuste a la pendiente NWSB para los tres periodos: 1 (P1, DOY 193-212), 2 (P2, DOY 213-239) y 3 (P3, DOY 240-257).

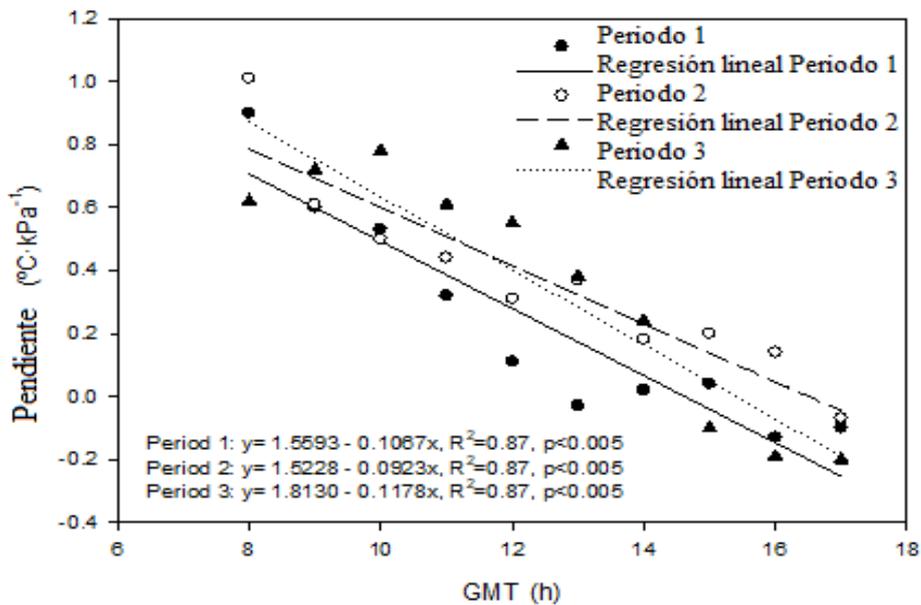
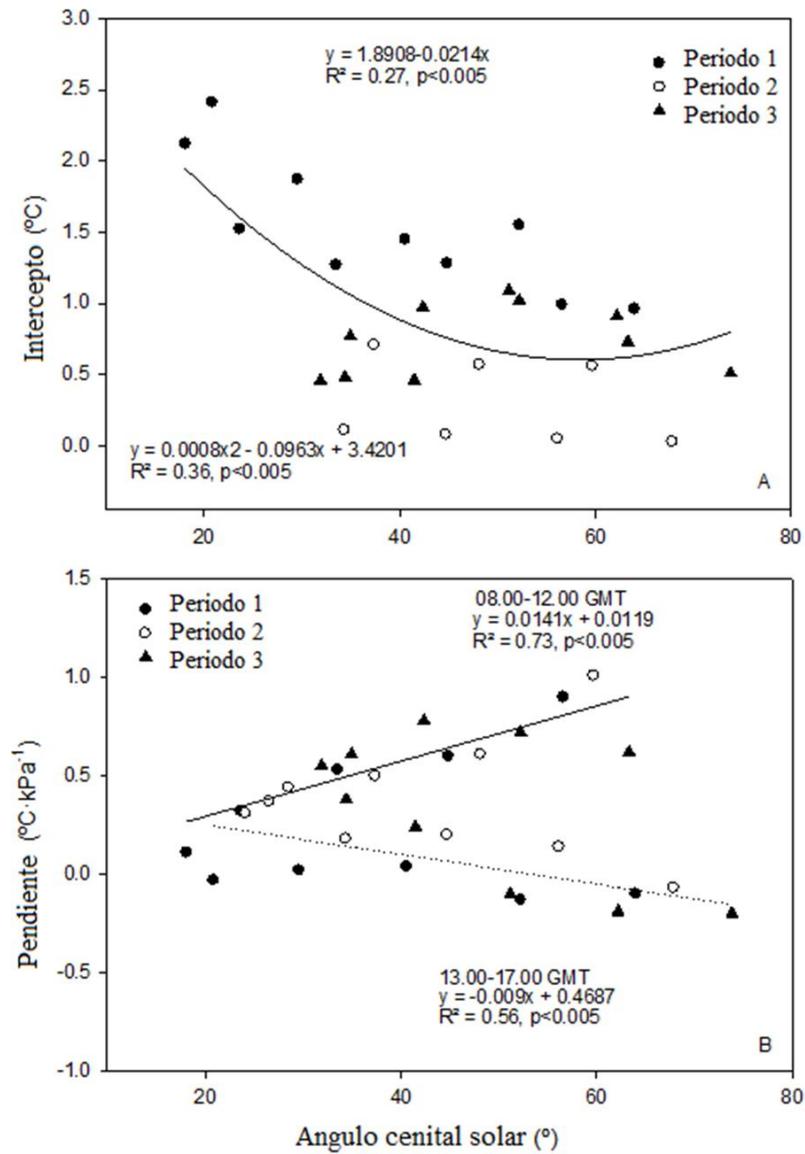




Figura IV.7 Relaciones del ángulo solar cenital ( $\theta Z$ ) con (A) los interceptos NWSB y (B) las pendientes NWSB para los tres periodos diferentes: 1 (P1, DOY 193-212), 2 (P2, DOY 213-239) y 3 (P3, DOY 240-257).



## **Evolución estacional y correlaciones entre indicadores térmicos ( $T_c$ , $T_c-T_a$ , CWSI) obtenidos por termometría y relaciones hídricas ( $\Psi_{\text{tallo}}$ )**

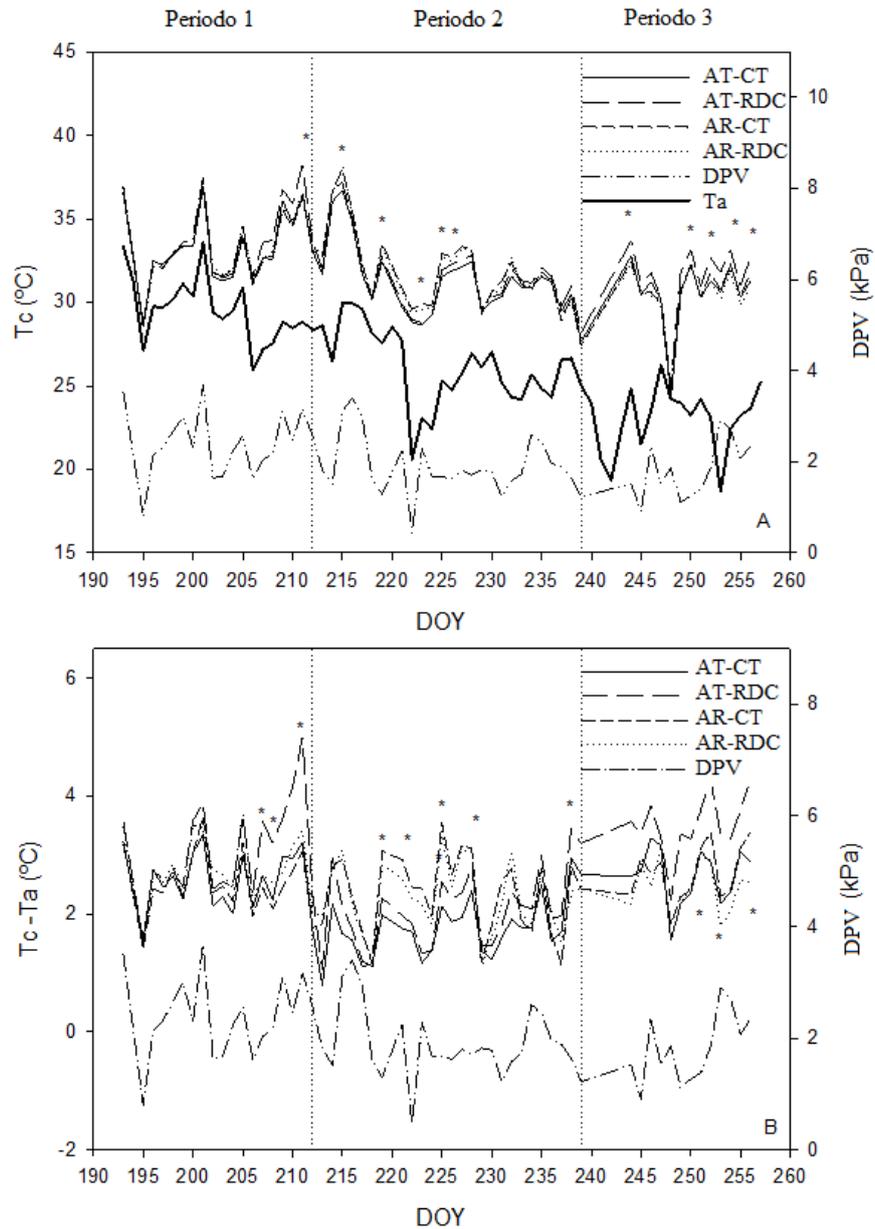
El CWSI se calculó a las 10.00 GMT ya que las diferencias  $T_c-T_a$  eran las más altas en ese momento. Se utilizaron las NWSBs obtenidas a las 10.00 GMT para cada periodo, ya que tenían buenos coeficientes de correlación ( $p < 0.005$ ) (0.73, 0.54 y 0.63 para P1, P2 y P3, respectivamente, Tabla IV.3) y presentaron los valores más altos de  $T_c-T_a$ .

Las tres NWSB con pendientes negativas encontradas a 17.00 (Tabla IV.3) también pueden ser utilizados para el cálculo del CWSI dado que los resultados fueron comparativamente similares a los obtenidos cuando el CWSI se calculó con las NWSB a las 10.00 GMT. La única diferencia fue que los valores de todos los tratamientos eran ligeramente más altos y se alejaban más de 0 cuando el CWSI se calculaba con las NWSB negativas que con los obtenidos a las 10.00 GMT.

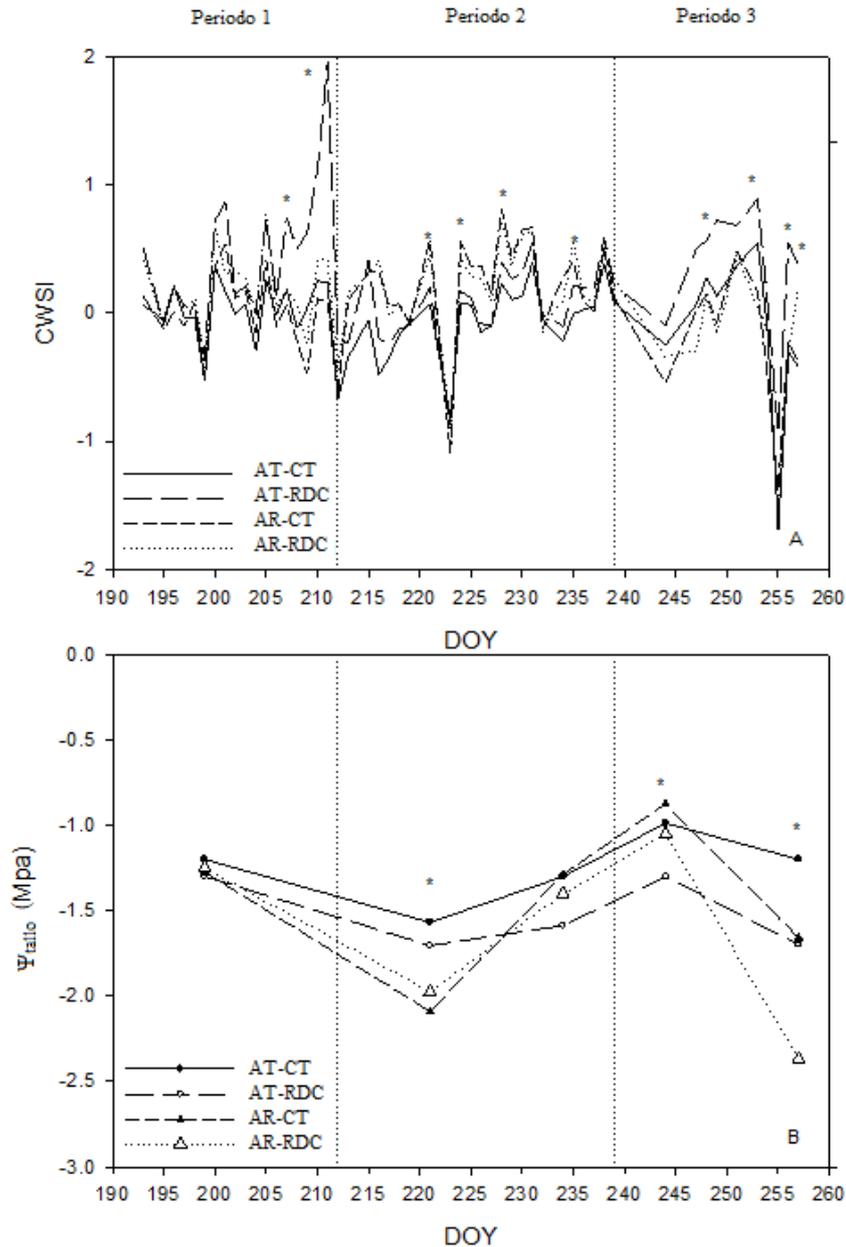
Con el fin de definir el indicador térmico más aconsejable para estimar el estado hídrico de las plantas de pomelo regadas con AR y RDC, se evaluó la información térmica y el potencial hídrico a lo largo del periodo experimental. Las figuras IV.8 y IV.9 muestran la evolución de  $T_c$ ,  $T_c-T_a$ , CWSI y el potencial hídrico del tallo para todos los tratamientos.



**Figura IV.8** Evolución de (A) la temperatura del dosel ( $T_c$ , °C) y (B) la diferencia entre  $T_c-T_a$  ( $T_c-T_a$ , °C) para cada tratamiento: AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC durante el periodo experimental. Cada valor es la media de cuatro mediciones individuales por árbol y repetición. \* Indica diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ). Las líneas verticales discontinuas dividen el periodo experimental en tres periodos con diferente nivel de estrés hídrico: 1 (DOY 193-212), 2 (DOY 213-239) y 3 (DOY 240-257).



**Figura IV.9** Evolución de (A) el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) recogido a las 10.00 GMT y (B) el potencial hídrico del tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ , MPa) para cada tratamiento: AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC durante el periodo experimental. Cada valor es la media de cuatro mediciones individuales por árbol y repetición. \* Indica diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ). Las líneas verticales discontinuas dividen el periodo experimental en tres periodos con diferente nivel de estrés hídrico: 1 (DOY 193-212), 2 (DOY 213-239) y 3 (DOY 240-257).





La  $T_c$  se vio influida en gran medida por la DPV (Figura IV.8A). En P1, los valores medios a las 10.00 GMT fueron 33.23, 33.75, 33.20 y 33.45 °C para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente. AT-RDC tuvo niveles significativamente más altos que el resto de los árboles, alcanzando máximos de hasta 39,28 °C. En P2, la  $T_c$  disminuyó (31.39, 31.68, 32.03 y 31.99 °C para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente) con respecto a P1, y los tratamientos AR tuvieron un valor máximo de 39.19 °C, que fue significativamente superior al de los árboles de control durante varios días. En P3, la  $T_c$  volvió a disminuir (30.13, 30.87, 30.09 y 29.95 °C para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente) y AT-RDC tuvo valores significativos (35.03 °C) superiores a los del resto de los tratamientos.

Se observó la misma tendencia para el curso estacional de  $T_c-T_a$ , aunque los valores de  $T_c-T_a$  en P3 fueron mayores que en P2 porque  $T_a$  disminuyó en mayor medida que  $T_c$  (Figura IV.8B). En general, los doseles totalmente regados fueron más fríos y, en consecuencia,  $T_c-T_a$  fue más negativo que en el resto de tratamientos de estrés, excepto en los árboles AR-RDC en P3. Este tratamiento mostró sus valores máximos de  $T_c-T_a$  a las 12.00 GMT y, por tanto, las  $T_c-T_a$  recogidas a las 10.00 GMT fueron inferiores a las encontradas en árboles de control (Figura IV.8B).

El patrón estacional del CWSI para todos los tratamientos puede observarse en la Figura IV.9A. Es importante destacar que los datos más precisos del CWSI se encontraron a las 10.00 GMT para todos los tratamientos, ya que, a esa hora, la  $T_c-T_a$  alcanzó los valores más altos, excepto para AR-RDC en P3. Por esta razón, el CWSI de AR-RDC en el último periodo se calculó a las 12.00 GMT. De este modo, los resultados se vieron notablemente influenciados por el régimen de riego (Figura IV.9). En los árboles control, los valores del CWSI fueron cercanos a 0 durante todo el período de estudio, con un valor medio de 0.00, -0.05 y 0.14 para P1, P2 y P3, respectivamente. Durante el período inicial de estrés hídrico (DOY 193-212), los tratamientos de riego deficitario, principalmente AT-RDC, mostraron valores de CWSI superiores a los encontrados en los árboles control, hasta aproximadamente 0.41 de media. Durante el periodo de estrés hídrico medio (DOY 213-239), el mayor CWSI se encontró en los tratamientos

AR (0.24 y 0.22 de media). En el último periodo de estrés hídrico (DOY 240-257), AT-RDC fue el tratamiento con el CWSI más alto.

Las principales diferencias entre el CWSI de los árboles de control y los distintos tratamientos de estrés fueron para AT-RDC en P1 y P3 (0.41 y 0.43, respectivamente), para AR-CT en P2 (0.30), y para AR -RDC en P3 (0.28).

Otro aspecto importante que hay que señalar es que hubo algunos días en que los valores de CWSI no fueron razonables, muy por encima de 1 o muy por debajo de 0, concretamente los DOY 211 y 255. Estos días se caracterizaron por una  $T_a$  y/o DPV por debajo o por encima de la media, es decir, con un ambiente atmosférico diferente al del período utilizado para derivar la NWSB. En estas condiciones,  $(T_c - T_a)_{LL}$  suele ser demasiado alta o demasiado baja en comparación con la  $T_c$ . Por lo tanto, el CWSI no es fiable y la relación señal-ruido del CWSI es peor (Jones et al., 2004; Testi et al., 2008).

Las mediciones de  $\Psi_{\text{tallo}}$  mostraron la evolución estacional del estrés hídrico en los tratamientos (Figura IV.9B). Durante la mayor parte del periodo experimental, los árboles control tuvieron un valor medio de alrededor de -1.18 MPa, que es indicativo de un estado hídrico de la planta cercano al óptimo (Romero-Trigueros et al., 2014; Ballester et al., 2011). Los tratamientos RDC disminuyeron a -1.75 y -2.4 MPa para AT-RDC y AR-RDC, respectivamente, al final del periodo RDC, lo que indica que el estrés hídrico experimentado por los árboles RDC fue moderadamente severo, según los resultados del CWSI. AR-CT también mostró valores cercanos a -2 MPa en P2. Las precipitaciones se produjeron durante este periodo en los días 241 y 242, lo que dio lugar a una recuperación temporal del déficit hídrico al principio de P3 (Figura IV.9B). Así pues, el estado hídrico de las plantas en los tratamientos no fue exclusivamente una consecuencia de los tratamientos de riego diferenciales aplicados.

Los indicadores térmicos ( $T_c$ ,  $T_c - T_a$  y CWSI) derivados de la termometría para todos los tratamientos se representaron frente al potencial hídrico del tallo. Se observaron regresiones lineales significativas en todos los casos (Tabla IV.4) y la bondad de ajuste de la relación fue similar ( $p < 0.005$ ) aunque el CWSI frente a



$\Psi_{\text{tallo}}$  tuvo el mayor coeficiente de correlación. La relación entre CWSI y  $T_c - T_a$  fue algo más débil ( $p < 0.01$ ) que la descrita anteriormente (Tabla IV.4). Cuando los indicadores térmicos se representaron frente a  $\Psi_{\text{tallo}}$  para cada tratamiento (AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC), las regresiones lineales también fueron significativas, pero en menor grado ( $p < 0.05$ ).

**Tabla IV.4** Coeficientes de correlación (R) para la regresión lineal, pendiente (a) e intercepto (b) encontrados entre el potencial hídrico del tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ) frente a la temperatura del dosel ( $T_c$ ), la diferencia entre la temperatura del dosel y la del aire ( $T_c - T_a$ ) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) y el CWSI frente a  $T_c - T_a$  de los pomelos, independientemente de los tratamientos de riego, durante el periodo de RDI (de DOY 193 a 257). N=20 (valor medio de cada tratamiento y 5 días).

	<b>Pendiente (a)</b>	<b>Intercepto (b)</b>	<b>R</b>	<b>P</b>
<b>Tc vs <math>\Psi_{\text{tallo}}</math></b>	-0.15	3.56	0.57	<0.005
<b>Tc-Ta vs <math>\Psi_{\text{tallo}}</math></b>	-0.33	-0.64	0.63	<0.005
<b>CWSI vs <math>\Psi_{\text{tallo}}</math></b>	-0.65	-1.47	0.74	<0.005
<b>CWSI vs Tc-Ta</b>	+0.97	2.41	0.51	<0.01

Estas buenas correlaciones se corroboraron en el DOY 257, cuando los árboles RDC estaban cerca del final del periodo de riego deficitario y, por tanto, bastante estresados. Mientras que el CWSI de los árboles de control estaba cerca de cero, el CWSI de los árboles AR y RDC era más alto y el  $\Psi_{\text{tallo}}$  significativamente más bajo, lo que probablemente era el resultado de una disminución de la conductancia del dosel vegetal de los árboles RDC en respuesta al estrés hídrico y salino (Testi et al., 2008).

## Discusión.

Los datos de la temperatura del dosel medidos por termometría (IRT) entre árboles del mismo tratamiento mostraron una baja variabilidad, lo que sugiere que los árboles estudiados estaban en un estado hídrico similar y los sensores estaban bien colocados para eliminar la variabilidad debida a la orientación de las hojas con respecto al ángulo solar (Testi et al., 2008).

La temperatura de las copas y el déficit de presión de vapor siguieron una curva diurna que se vio ampliamente influenciada por el ciclo de radiación solar (Figura IV.2) En un día típico de verano, la demanda de evaporación aumenta a medida que avanza el día. La tasa de transpiración y la apertura estomática también aumentarían, lo que conduciría a unas copas más frías en los frutales (González-Dugo et al., 2013). Sin embargo, esta respuesta estomática a condiciones ambientales varía entre especies (Ballester et al., 2013). Los cítricos muestran un comportamiento conservador. El aumento de la temperatura a lo largo del día de los pomelos implica un cierre estomático parcial que resulta en una baja tasa de transpiración (Romero-Trigueros et al., 2017), incluso en condiciones de riego completo (González-Dugo et al., 2013; Romero-Trigueros et al., 2014) y una baja DPV también.

La máxima apertura estomática se alcanza a primera hora de la mañana y luego los estomas se cierran parcialmente durante el resto del día (Romero-Trigueros et al., 2014). Esta característica de las plantaciones de cítricos es bien conocida y ha sido caracterizado en el pasado (González-Dugo et al., 2014; Veste et al., 2000; Villalobos et al., 2009). Además, la transpiración en los cítricos es menor que la de otras especies de árboles frutales durante el verano (Villalobos et al., 2013). Esta información de los patrones diarios de cierre estomático en los cultivos de pomelo es clave para entender la fluctuación del dosel.

En este estudio, la  $T_c$  fue mayor que la  $T_a$  en condiciones de pleno riego y de estrés hídrico durante las horas centrales del día, lo que resulta en valores positivos de  $T_c - T_a$  para un amplio rango de DPV, tal y como se ha descrito para naranjos y mandarinos (González-Dugo et al., 2014). Por el contrario, otros



autores encontraron que  $T_c$  era menor que  $T_a$  en lima dulce, lo que da valores negativos de  $T_c - T_a$ . Esto podría explicarse porque el uso del agua de la lima dulce es bastante diferente al de otras especies de cítricos (Sepaskhah et al., 1995).

El mayor valor de  $T_c - T_a$  se observó antes de las 12.000 GMT para todos los tratamientos (Figura IV.2), lo que indica la máxima cantidad de estrés a lo largo del día y demuestra el uso de mediciones para representar índices como el CWSI. Por la noche, las temperaturas del dosel convergieron (De Jongea et al., 2015) y la diferencia  $T_c - T_a$  de todos los árboles se acercó a  $0^\circ\text{C}$ , que es ligeramente superior para los tratamientos AR y RDC.

Durante el periodo de experimentación, los tratamientos mostraron claras diferencias en  $T_c$ , principalmente en las fases media y final del RDC, lo que indica la dependencia de la temperatura de la copa a salinidad y al riego deficitario. Este comportamiento podría ser sintomático de la reducción de la transpiración debida al estrés salino e hídrico. Las máximas diferencias entre las temperaturas del dosel de los tratamientos se registraron al final del periodo de RDC para el tratamiento que combinaba tanto el estrés hídrico como el salino. Este valor máximo ( $6.85^\circ\text{C}$ ) fue superior a otros descritos por Ballester et al., (2013) y García-Tejero et al.,(2011).

El establecimiento de unas NWSB adecuadas es clave para obtener valores precisos de CWSI. Las amplias fluctuaciones observadas en  $T_c$  (Figura IV.5) y el cierre de estomas que sufren los cítricos con el aumento de la DPV (Romero-Trigueros et al., 2014) dieron lugar a un laborioso cálculo de la relación entre  $T_c - T_a$  frente al DPV. Aunque se encontraron regresiones lineales que representan la NWSB con una alta significancia ( $p < 0.005$ ), la diferencia entre  $T_c - T_a$  y DPV era elevada y estaba de acuerdo con otros resultados obtenidos en cítricos (González-Dugo et al., 2014). Por el contrario, otros cultivos en los que se evaluó la NWSB, como el pistacho (Testi et al., 2008) o el olivo (Egea et al., 2017), presentaron una menor dispersión que los datos aportados en esta tesis. Esto se debió probablemente a las fluctuaciones en la temperatura del dosel (González-Dugo et al., 2014) que requirió la evaluación cautelosa del intervalo de tiempo necesario para estimar la temperatura media del dosel en relación con la temperatura del

aire, como se describe en la Figura IV.2. El mejor ajuste se mostró para los promedios  $T_c-T_a$  de 60 minutos, de acuerdo también con otros estudios (González-Dugo et al., 2014).

Las mejores correlaciones entre  $T_c-T_a$  y DPV se encontraron en las primeras horas de la mañana con baja DPV y altos valores de  $T_c-T_a$  (Tabla IV.1 y Figura IV.6). Las pendientes fueron positivas ya que, cuando el DPV aumenta, los estomas se cierran parcialmente, la temperatura de la hoja aumenta y, por lo tanto, la  $T_c-T_a$  aumenta (González-Dugo et al., 2013). Los cítricos son conocidos por ser conservadores en el uso del agua y la conductancia estomática de los cítricos disminuye con el aumento de los déficits de presión de vapor (Romero-Trigueros et al., 2017; Cohen et al., 1983).

Las NWSB obtenidas en este caso no fueron similares a los reportados para los otros tres cultivos de cítricos en los que se han publicado NWSB: lima dulce (Sepaskhah et al., 1994), naranja y mandarina (González-Dugo et al., 2014). Hasta ahora, la NWSB con una pendiente positiva no ha sido descrita en la literatura. En los dos trabajos citados anteriormente  $T_c$  fue generalmente mayor que  $T_a$  para los valores habituales de DPV, como en los pomelos. Sin embargo, las pendientes de las NWSBs que correlacionan  $T_c-T_a$  frente a DPV fueron siempre negativas, al contrario de la pendiente encontrada en los resultados. Estas diferencias pueden explicarse en el caso de la lima dulce porque la  $T_c$  se midió con un termómetro infrarrojo manual a 2 m del árbol, a unos  $15^\circ$  por encima de la horizontal, que es un procedimiento que no evaluaría la  $T_c$  de la parte superior de la copa. En el caso de los mandarinos y naranjos, las NWSB se establecieron utilizando mediciones de  $T_c-T_a$  promediadas entre las 11:30 y 12:30 GMT de ciclos vegetativos completos:  $T_c-T_a = -0.50-DPV + 4.06$  y  $T_c-T_a = -0.38-DPV + 4.59$  para la mandarina y la naranja, respectivamente.

La variación horaria encontrada en las NWSB ha sido descrita en otros tres cultivos, como pistacho (Testi et al., 2008), vid (Bellvert et al., 2014) y olivo (Egea et al., 2017), pero no se había descrito en cítricos. Estos cambios horarios se debieron a variaciones en todos los parámetros ajustados de las NWSBs, ya que tanto la pendiente como la intercepción variaron a lo largo del día. Una explicación para el desplazamiento de las NWSBs fue proporcionada por la ecuación teórica de



Jackson para la NWSB (Jackson et al. 1981), que mostraba que el intercepto aumenta con  $R_s$  y disminuye con la velocidad del viento. Este comportamiento fue predicho teóricamente por Hipps et al.(1985) y apoyado con algunas mediciones, pero sólo ha sido confirmado hasta ahora por Testi et al.(2008) para el pistacho y Egea et al.(2017) para el olivo.

En este estudio, los IRTs se dispusieron en una vista nadir, por lo que se dirigieron a una superficie de follaje relativamente horizontal en la parte superior de la del dosel. La radiación que incide sobre la parte del dosel incluida en el campo de visión del IRT debería estar estrechamente relacionada con el ángulo solar (Testi et al., 2008). El viento en la zona experimental de este estudio fue moderado y constante durante todo el periodo de prueba. Por lo tanto, su efecto sobre la NWSB fue insignificante (Testi et al., 2008). La pendiente y el intercepto de la NWSB estaban probablemente correlacionados con  $\theta Z$  ( $p < 0.005$ ) (Figura IV.7). En cuanto a la pendiente de la NWSB, presentó una marcada histéresis a lo largo del día y aumentó hasta el mediodía y disminuyó a partir de las primeras horas de la tarde con  $\theta Z$ . En cuanto a la intersección de la NWSB, aumentó a medida que el  $\theta Z$  se acercaba a  $0^\circ$  (al mediodía). En otros estudios, las relaciones entre el intercepto y la radiación solar han sido lineales (Testi et al., 2008) o han mostrado una histéresis durante diferentes períodos estacionales (Egea et al., 2017). Por lo que sabemos, es la primera vez que se encuentran relaciones entre la pendiente y el ángulo solar.

Dividimos todo el periodo experimental en tres subperíodos en función de la radiación solar acumulada y el DPV. El nivel de concordancia de NWSB mejoró durante ciertas horas del día y períodos. Además, la intercepción fue mayor en P1 y P3 (correspondientes a los meses de julio y septiembre) que en P2 (agosto), dado que los valores de  $T_c - T_a$  eran mayores. Además, descubrimos que cuanto menor era el valor del intercepto, mejores eran las correlaciones entre  $T_c - T_a$  y DPV. Por último, al evaluar los datos por separado según los distintos periodos, también encontramos que la pendiente de las NWSB se volvió significativamente negativa por la tarde.

Los valores de la pendiente estaban más influidos por la hora que por las variaciones estacionales y los valores de intercepción por ambas. El comportamiento horario cambió significativamente con la estación (Figura IV.5 y IV.6).

La variación de las NWSB plantea la cuestión de cómo cambia el CWSI resultante cuando es determinado en diferentes momentos del día. En el pasado, se encontraron muchas dificultades para la evaluación del CWSI en los cítricos (Ballester et al., 2013) debido a las fluctuaciones diurnas de la resistencia estomática (Levy et al., 1976) y de la conductancia del dosel (Dzikiti et al., 2007). Encontramos adecuadas NWSB para diferentes horas del día y diferentes periodos estacionales que se utilizaron para el cálculo preciso de CWSI.

Además de conseguir NWSBs precisas, para una adecuada gestión del riego con estrategias de AR y de riego deficitario, es esencial identificar el indicador térmico más apropiado y robusto, así como el mejor momento del día para realizar las lecturas térmicas (García-Tejero et al., 2018).

A pesar de que las mediciones térmicas realizadas al mediodía se utilizan generalmente como estándar para la evaluación del estado hídrico de las plantas, en el pomelo, los datos obtenidos a las 10.00 GMT, describieron mejor la variabilidad espacial a lo largo del periodo experimental, excepto para los árboles AR-RDC en el periodo 3, en los que los valores máximos de  $T_c - T_a$  medidos por IRT en las hojas de la parte superior del dosel se recogieron a las 12.00 GMT (Figura IV.12B). Esto se debió probablemente a que el tratamiento AR-RDC mantuvo los estomas parcialmente abiertos hasta esa hora.

El estrecho comportamiento encontrado entre  $T_c - T_a$  y  $T_c$  con  $\Psi_{\text{tallo}}$  ( $p < 0.005$ ) (Tabla IV.4) confirmó los hallazgos previos sobre el uso de la temperatura del dosel como indicador del estado hídrico del cultivo, incluyendo los cítricos (García-Tejero et al., 2011) donde los autores encontraron correlaciones más altas en los naranjos Navelina ( $r^2 = 0.75$ ). Por el contrario, otros autores como Ballester et al. (2013) informaron sobre la dificultad de utilizar mediciones de  $T_c$  obtenidas con IRTs fijas y normalizadas con la temperatura del aire temperatura del aire ( $T_c -$



$T_a$ ) como indicador de estrés hídrico en cítricos porque estaban poco relacionadas con  $\Psi$ . La relación débil entre  $T_c-T_a$  y  $\Psi$  también se ha informado en árboles Navel Lane Late bajo RDC (Ballester et al., 2013), y en naranjos Powell Navel y mandarinas Clemenvilla (Zarco-Tejada et al., 2012) en los que se obtuvo  $T_c$  con una cámara térmica.

En nuestro trabajo, la idoneidad del CWSI para evaluar el estado hídrico en pomelo también se observó en su correlación con el  $\Psi_{\text{tallo}}$  (Tabla IV.4). El CWSI mostró una buena concordancia con el  $\Psi_{\text{tallo}}$  ( $R = 0.74$ ,  $p < 0.005$ ). Este valor  $R$  fue ligeramente mayor que los obtenidos para las relaciones entre  $T_c$ ,  $T_c-T_a$  y  $\Psi_{\text{tallo}}$  (Tabla IV.4).

En general, como demostraron nuestros datos, los diferentes indicadores estacionales obtenidos por termometría infrarroja tienen ventajas y desventajas, que deben ser tenidas en cuenta cuando se utilizan en campo para el seguimiento de la salinidad y el estrés hídrico. En cuanto a la simplicidad y tiempo, el  $T_c$  y el  $T_c-T_a$  serían más recomendables como indicador preliminar de estrés porque son fáciles de calcular (García-Tejero et al., 2018). Sin embargo, las condiciones climáticas influyen más que el CWSI. Por lo tanto, pueden tener grandes limitaciones para la caracterización por teledetección del estado hídrico de los cultivos, mientras que el CWSI sería más robusto, especialmente en condiciones ambientales más variables a lo largo del día (García-Tejero et al., 2018).

## **Conclusiones**

En los pomelos, la temperatura del dosel medida por termometría infrarroja fue mayor que la temperatura del aire, lo que resulta en diferencias positivas entre  $T_c-T_a$  para un amplio rango de DPV durante las horas centrales del día. Los valores máximos de  $T_c-T_a$  se encontraron antes del mediodía.

Las correlaciones más significativas entre  $T_c-T_a$  y DPV para establecer la línea de base sin estrés hídrico (NWSB) se encontraron en las primeras horas de la mañana, cuando el DPV era bajo y los valores de  $T_c-T_a$  altos. Las pendientes de

dichas correlaciones fueron positivas. El indicador térmico que tuvo el mayor nivel de concordancia con el potencial hídrico del tallo de los diferentes tratamientos fue el CWSI, aunque  $T_c$  y  $T_c - T_a$  estaban también significativamente correlacionados.

En resumen, en este trabajo se demostró la idoneidad de los indicadores térmicos, principalmente el CWSI, a lo largo de diferentes periodos estacionales para determinar el estado hídrico de los pomelos bajo estrés salino por agua regenerada y un periodo de déficit hídrico. Algunos de los aspectos descritos en este trabajo se describieron por primera vez en la literatura, que pueden incluir, por un lado, el uso de NWSB con pendientes positivas para el cálculo del CWSI, y, por otro lado, la variación horaria y variación estacional de las NWSB en los cítricos. Las futuras investigaciones sobre la utilidad de la termometría para determinar cambios horarios dentro del mismo día se hacen necesaria.



## ***APARTADO 2. “Isohidricidad de dos especies diferentes de cítricos bajo condiciones de riego deficitario y agua regenerada”.***

### **Resumen**

Se evaluaron los efectos de los cambios diarios en las demandas de evaporación y los contenidos de agua del suelo en la fisiología vegetal de los cultivos de pomelo y mandarina regados con agua regenerada (AR) y agua procedente del trasvase Tajo-Segura (AT) combinadas con dos estrategias, una consistente en un riego completo (CT) y otra sin riego (nI). Las respuestas fisiológicas fueron diferentes según la especie.

El pomelo mostró un patrón isohídrico que restringió el uso del potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_1$ ) como indicador del estado hídrico de la planta. Su estado hídrico se vio afectado por la salinidad (AR) y el estrés hídrico (nI), principalmente con la combinación de ambos (AR-nI); sin embargo, la mandarina resultó ser relativamente más tolerante a la salinidad y más sensible al estrés hídrico, principalmente por sus bajos niveles de conductancia hidráulica (K), mostrando una caída crítica en  $\Psi_1$  que condujo a severas pérdidas de la conductancia hidráulica de la raíz ( $K_{raiz}$ ) y del dosel ( $K_{dosel}$ ) en AT-nI. Este comportamiento no se observó en AR-nI debido a una reducción del volumen del dosel vegetal como característica adaptativa. Así, el mandarina mostró un comportamiento más anisohídrico en comparación con el pomelo, pero isohidrodinámico ya que su gradiente de potencial hídrico hidrodinámico de las raíces a los brotes ( $\Delta\Psi_{planta}$ ) fue relativamente constante a través de variaciones en la conductancia estomática ( $g_s$ ) y el potencial hídrico del suelo.

La  $g_s$  se consideró un buen indicador del estado hídrico de la planta en ambas especies, y sus respuestas al aumento diario del DPV y a la sequía del suelo estuvieron fuertemente correlacionados con  $K_{raiz}$ . El ABA no mostró ningún efecto



sobre la regulación estomática, destacando el papel fundamental de la hidráulica de la planta en el cierre estomático.

## **Introducción y Objetivos**

La sensibilidad al déficit de presión de vapor atmosférico (DPV) es una estrategia primaria por la que las plantas regulan el intercambio de gases (Grossiord et al., 2020). Un incremento en el DPV o una reducción en el contenido de agua del suelo conduce a una disminución de la conductancia estomática ( $g_s$ ) o una cascada hidráulica de potencial hídrico en el árbol, que se hace mayor y más duradera cuando la alta demanda de agua atmosférica se combina con el estrés hídrico del suelo (Pou et al., 2012). Esta capacidad de las plantas para regular la pérdida de agua por transpiración y de minimizar las fluctuaciones del potencial hídrico define a las plantas como isohídricas o anisohídricas (Dal Santo et al., 2016). Las especies más isohídricas son propensas a la falta de carbono, mientras que las más anisohídricas son más propensas a morir por desecación del tejido a través de un fallo hidráulico (Hartmann et al., 2021).

No obstante, el mecanismo físico preciso por el que se coordinan la  $g_s$  y el potencial hídrico sigue siendo objeto de debate (Rodríguez-Domínguez et al., 2020; Yang et al., 2021), así como el comportamiento isohídrico-anisohídrico y sus implicaciones en la fotosíntesis de diferentes cultivos de vid (Hochberg et al., 2013) y en la cinética de apertura estomática de otras especies leñosas (Meinzer et al., 2017); sin embargo, no hemos encontrado estudios publicados que hayan definido este fenómeno en mandarinos o pomelos, aunque en general los cítricos se consideran isohídricos (Mira-García et al., 2016). Por otro lado, en los cítricos con estrés salino, la disminución de las tasas fotosintéticas podría estar también asociada a la reducción de la difusión de  $CO_2$  hacia los estomas (Banuls et al., 1997).

Se ha demostrado que la exposición a la sal puede afectar al metabolismo de la planta a través de (i) un efecto iónico, causando una acumulación gradual de niveles tóxicos de Cl y Na en las partes aéreas cuando no se produce la compartimentación de los iones en la vacuola, o a través de (ii) un efecto osmótico

provocando un déficit de agua. Uno de los principales mecanismos que utilizan las plantas para adaptarse al estrés osmótico, es el ajuste osmótico (AO), que puede mantener la turgencia positiva de la hoja, también llamado potencial de presión ( $\Psi_p$ ), necesario para mantener los estomas abiertos y sostener el intercambio de gases (Vivaldi et al., 2021), ya que el cierre estomático puede verse afectado por cambios en el  $\Psi_p$  dinámico de las células a través de la regulación de la retroalimentación (MacAdam et al., 2016).

Además, el papel de la hormona ácido abscísico (ABA) en la regulación de  $g_s$  es también una controversia permanente (Dodd et al., 2013; Shang et al., 2021). Aunque hasta ahora el ABA parece ser el principal factor implicado en la regulación del cierre estomático bajo estrés hídrico (Christmann et al., 2005; Israelsson et al., 2006; Reynolds et al., 2010), existen considerables evidencias de que las plantas son capaces de responder directamente a las señales hidráulicas causadas por el déficit hídrico (Brodrribb et al., 2004; Christmann et al., 2007).

Las señales hidráulicas pueden estar implicadas en las respuestas de los estomas a la disminución del potencial hídrico (Saliendra et al., 1995; Mrad et al., 2002), como se ha citado anteriormente, o en la reducción de la conductancia hidráulica (K) durante el estrés (Sperry et al., 2002). Se ha demostrado que los cambios estacionales de K contribuyen a los cambios de  $g_s$  (Rodríguez-Dominguez et al., 2016); sin embargo, no está claro si los cambios diarios de K que se producen de forma natural a lo largo del día, influyen en los estomas (Buckley et al., 2019).

Algunas de las respuestas descritas hasta ahora no siempre ocurren simultáneamente en las especies de los cítricos, ya que algunas dependen del porta injerto (García-Tejero et al., 2010; Romero-Trigueros et al., 2019; Sampaio et al., 2021); por tanto, la tolerancia o sensibilidad a la sequía y la salinidad está determinada por el porta injerto (Rodríguez-Gamir et al., 2010; Gimeno et al., 2012), mientras que su importancia bajo la interacción de ambos estreses no ha sido reportada todavía hasta el momento. Además, los estudios que han evaluado la tolerancia en cultivos leñosos tras largos periodos de tiempo aplicando estos estreses son escasos debido al coste y al tiempo que requieren. En consecuencia, entender cómo los estreses salinos e hídricos afectan a la dinámica del intercambio



de vapor planta-atmósfera a través de sus efectos diarios sobre  $g_s$  (Xiong et al., 2020) es importante en el contexto del cambio climático que incrementa la aparición de sequías (Rodríguez-Dominguez et al., 2019) y DPV (Grossiord et al., 2020) en todo el mundo.

Este estudio pretende evaluar los efectos del riego a largo plazo con AR salino y del estrés hídrico severo mediante la supresión total del riego durante un periodo, así como la combinación de ambos estreses (salino y hídrico), sobre los cambios diarios en la fisiología (relaciones hídricas, elementos fitotóxicos, conductancia hidráulica, ABA) de dos especies de cítricos con diferentes portainjertos y potencial productivo, como son, pomelo (Pedrero et al., 2015) y mandarina (Nicolás et al., 2016), en condiciones de campo. Además, evaluamos la respuesta estomática a factores ambientales y fisiológicos con el objetivo de encontrar indicadores útiles del estado hídrico de la planta para la programación del riego.

Un aspecto fundamental es caracterizar el grado de isohidricidad de ambas especies. En este estudio, barajamos la hipótesis de que el tratamiento más afectado fisiológicamente será el que combine ambos estreses, y en el caso de que ambas especies de cítricos sean isohídricas,  $g_s$  sería un mejor indicador que  $\Psi_1$ .

## **Materiales y Métodos**

### **Área experimental y tratamientos de riego.**

El ensayo se llevó a cabo en una finca comercial de cítricos, situado en el noreste de la región de Murcia, en Campotéjar (Capítulo III). Se dispuso de dos parcelas experimentales de 0,5 ha cada una. La primera se cultivó con pomelos Star Ruby (*Citrus paradisi Macf*) adultos de 8 años injertados sobre portainjertos Macrophylla (*Citrus macrophylla*). La segunda parcela contenía mandarinos adultos de 14 años (*Citrus clementina* cv. 'Orogrande') injertados sobre citrange Carrizo (*Citrus sinensis (L.) Osb. Poncirus trifoliata (L.)*). La parcela experimental se regó con

dos fuentes de agua de calidad agronómica distinta (**AT** y **AR**) y el riego se programó en función de la evapotranspiración diaria del cultivo ( $ET_c$ ), siendo los tratamientos establecidos: **AT-CT**, **AR-CT**, **AT-nI** y **AR-nI** (Capítulo III).

### Mediciones

Las mediciones fisiológicas de la planta se llevaron a cabo periódicamente desde el DOY 213 a 283, es decir, antes del inicio del periodo de supresión total del riego y hasta 9 días después del final. Cuando se alcanzó un estrés hídrico severo en alguno de los tratamientos de nI, se realizó una evolución diurna (248 DOY, 34 días después del inicio de la supresión total del riego).

### Estado hídrico de la planta

Conductancia estomática ( $g_s$ ), temperatura de la hoja ( $T_1$ ), déficit de presión de vapor basado en temperatura de la hoja (DPV), potencial hídrico del tallo ( $\Psi_s$ ), potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_1$ ), potencial osmótico ( $\Psi_\pi$ ), y el potencial osmótico de la hoja a plena turgencia ( $\Psi_{100s}$ ) se determinaron en una hoja madura, que estaba completamente expandida en la zona media de cada árbol. Aquí,  $\Psi_1$  se midió antes del amanecer y se utilizó como una estimación del potencial hídrico del suelo ( $\Psi_{suelo}$ ).

Las mediciones se realizaron en hojas que fueron colocadas en una cubeta de hojas de 6 cm<sup>2</sup>. Las mediciones se realizaron a temperatura y humedad relativa del aire ambiental, llevándose a cabo aproximadamente cada hora en la misma hoja desde las 06.00 hasta las 19.00 GMT.

El  $\Psi_s$  se midió al mediodía y las hojas se cubrieron con papel de aluminio y se encerraron dentro de bolsas de polietileno al menos 2 h antes de la recolección y medición (McCutchan et al 1992). El  $\Psi_1$  se midió periódicamente a lo largo del día. Las hojas utilizadas para medir el  $\Psi_1$  antes del amanecer y al mediodía se congelaron en nitrógeno líquido (-196 °C) y se almacenaron a -30 °C.



El potencial osmótico de la hoja a plena turgencia ( $\Psi_{100s}$ ) se estimó al mediodía, utilizando hojas cogidas con sus pecíolos colocados en agua destilada durante la noche para alcanzar la saturación completa. El ajuste osmótico (AO) se calculó como la diferencia de  $\Psi_{100s}$  entre el control (AT-CT) y el resto de los tratamientos.

La conductancia hidráulica del dosel ( $K_{\text{dosel}}$ ) y la conductancia raíz ( $K_{\text{raiz}}$ ) se estimaron mediante el método del flujo evaporativo (Brodribb et al., 2003). Por un lado, el  $K_{\text{dosel}}$  se calculó en condiciones de estado estacionario según la ley de Ohm,

$$K_{\text{dosel}} = T_r / \text{Mediodía } \Delta\Psi_{\text{tallo-hoja}}$$

donde  $\Delta\Psi_{\text{tallo-hoja}}$  del mediodía es la caída del potencial hídrico (MPa) a través de la vía tallo-hoja, obtenida como la diferencia entre  $\Psi_s$  e  $\Psi_1$ , ambas al mediodía. Por otro lado,  $K_{\text{raiz}}$  se calculó también según la ley de Ohm,

$$K_{\text{dosel}} = T_r / \text{Mediodía } D\Psi_{\text{tallo-hoja}}$$

donde  $\Delta\Psi_{\text{raiz}}$  del mediodía es la caída del potencial hídrico (MPa) a través de la vía raíz-tallo obtenida como la diferencia entre  $\Psi_1$  antes del amanecer e  $\Psi_s$  al mediodía. El potencial hidrodinámico (inducido por la transpiración) de las raíces a los brotes ( $\Delta\Psi_{\text{Planta}}$ ) se calculó como la diferencia entre el  $\Psi_1$  de antes del amanecer y el del mediodía.

## **Análisis químico de las hojas**

Se determinó el ácido abscísico (ABA) de las hojas y los elementos fitotóxicos como el Na y el Cl en veinte hojas maduras, que estaban completamente expandidas desde la zona media del brote en cada árbol. Las muestras de hojas utilizadas para medir las concentraciones de ABA fueron liofilizadas y finamente molidas. Se añadió agua desionizada en una proporción de peso de 1:50. Los extractos de las muestras se analizaron utilizando un radioinmunoensayo (Quarrie et al., 1988) para obtener los contenidos de ABA en las hojas. Los elementos fitotóxicos se determinaron como en Romero-Trigueros, 2014.

## **Diseño experimental y análisis estadístico**

El diseño experimental para cada tratamiento de riego incluyó 4 parcelas experimentales estándar distribuidas siguiendo un diseño completamente aleatorio. Cada réplica estaba compuesta por 12 árboles, organizados en 3 filas adyacentes. Se utilizaron un total de 192 pomelos y 192 mandarinos. Todas las mediciones se realizaron en los dos árboles centrales de la fila central de cada réplica (2 árboles por bloque, 8 por tratamiento), mientras que los árboles del borde se excluyeron del estudio para eliminar posibles efectos de borde.

Los valores medios de cada tratamiento se analizaron mediante el test de Tukey. La importancia de los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) de las ecuaciones de regresión lineal se indicaron como coeficientes de correlación de Pearson (R). Los datos también se analizaron con un ANOVA de dos vías de medidas repetidas para examinar la interacción entre los tratamientos y los muestreos temporales. Además, los datos se analizaron mediante un ANOVA de dos vías teniendo en cuenta la calidad y cantidad de agua como factores principales. Estos análisis estadísticos se realizaron con el software IBM SPSS Statistics (versión 23.0 para Windows, SPSS Inc.; Chicago, IL, USA).

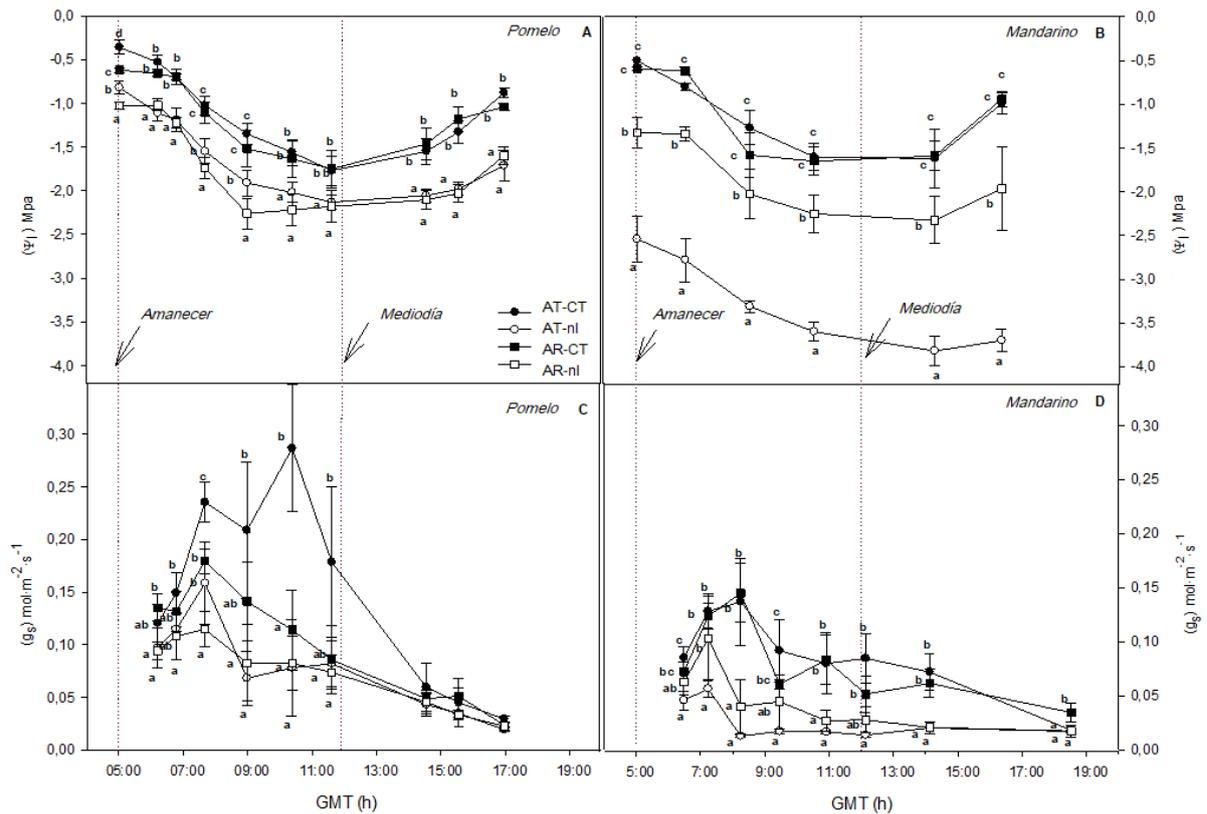


## **2. Resultados**

### **2.1. Efectos de las estrategias de riego sobre las relaciones hídricas, la conductancia hidráulica y el ABA**

Los tratamientos de riego completo (CT) de los cultivos de pomelo y mandarina dieron lugar a valores similares de  $\Psi_1$  a lo largo del día, independientemente de la calidad del agua, aunque en los cultivos de pomelo los valores de AR-CT fueron ligeramente inferiores a los del control (AT-CT). Los tratamientos sin riego (nI) para ambos cultivos dieron lugar a valores de  $\Psi_1$  inferiores a los del control en cada punto de muestreo. Los tratamientos más estresados fueron AR-nI en pomelo y AT-nI en mandarina, alcanzando este último, valores de alrededor de 3,8 MPa (Figura IV.10). El  $\Psi_1$  medido antes del amanecer (en adelante  $\Psi_{\text{suelo}}$ ) fue reducido en los tratamientos nI de ambos cultivos y también en AR-CT de pomelo.

**Figura IV.10.** Evolución diaria del potencial hídrico foliar ( $\Psi_1$ ) (A, B) y de la conductancia estomática ( $g_s$ ) (C, D) para cada tratamiento (AT-CT): agua de trasvase riego completo; AT-nI: agua de trasvase sin riego; AR-fl: agua regenerada regada completamente; AR-nI: agua regenerada no regada y cultivo (pomelo y mandarina). Cada punto es la desviación estándar media de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Diferentes letras indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según el test de Tukey.



En cuanto al intercambio de gases (Figura IV.10 C, D), en el pomelo, los árboles de control alcanzaron el valor máximo diario de  $g_s$  ( $0,287 \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) a las 10.30 GMT; sin embargo, para el resto de los tratamientos estresados, los valores máximos se observaron antes (07.40 GMT) y fueron significativamente inferiores a los del control ( $g_s$  se redujo en un 44,7%, 37,4% y 60,0% para AT-nI, AR-CT y AR-nI, respectivamente). En mandarino, los árboles control y AR-CT alcanzaron los valores máximos diarios de  $g_s$  ( $0,141 \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) en torno a las 08.15 GMT.

Sin embargo, al igual que en el caso del pomelo, los árboles nI alcanzaron los valores máximos diarios de  $g_s$  antes (07.15 GMT), que fueron

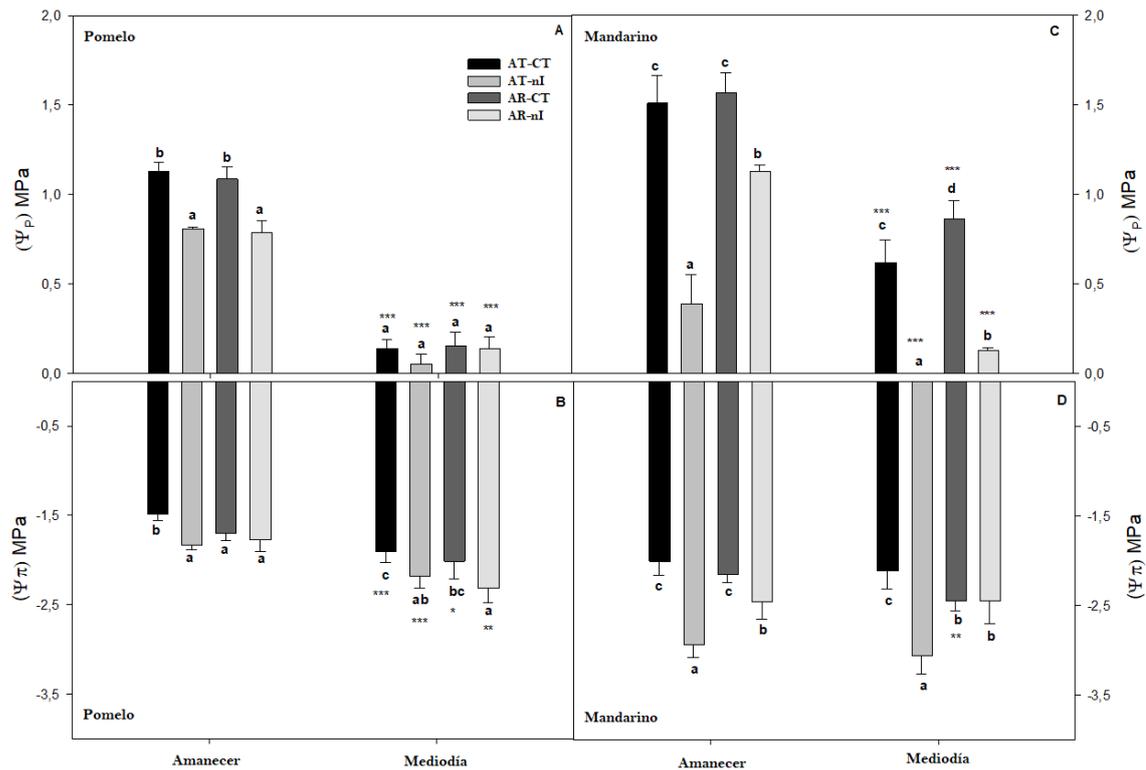


significativamente inferiores a los del control ( $g_s$  se redujo en un 58,8 y un 24,8% para AT-nI y AR-nI, respectivamente). Se observaron comportamientos similares para ambos cultivos durante los muestreos que se realizaron durante los dos meses de supresión del riego. En general, los tratamientos que se vieron más afectados por las estrategias de riego y los cambios diarios de DPV fueron: AR-nI en los pomelos, tal y como habíamos hipotetizado; AT-nI en los mandarinos (Figura IV.10). Los pomelos mostraron mayores de  $g_s$  que los mandarinos.

En cuanto a los efectos de las estrategias de riego sobre los componentes  $\Psi_1$  (Figura IV.11), en los pomelos, los valores de  $\Psi_\pi$  de todos los tratamientos estresados disminuyeron significativamente con respecto al control antes del amanecer (antes de que las condiciones climáticas afectaran al estado hídrico de la planta) y al mediodía (excepto AR-nI). El tratamiento con los valores de  $\Psi_\pi$  más negativos fue AR-nI.

Los valores de  $\Psi_P$  fueron similares en los tratamientos bien regados (AR-CT y AT-CT) y significativamente menores en los tratamientos nI antes del amanecer. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos al mediodía, ya que los valores de  $\Psi_P$  de los tratamientos bien regados disminuyeron significativamente (Figura IV.11 A, B). En el cultivo del mandarino, los valores de  $\Psi_\pi$  de los tratamientos AT-CT y AR-CT, fueron similares antes del amanecer, según el  $\Psi_{suelo}$ , aunque al mediodía los valores de AR-CT disminuyeron significativamente. Los valores de  $\Psi_\pi$  de los tratamientos nI fueron significativamente inferiores a los del control en ambos puntos de muestreo, siendo el tratamiento AT-nI el más afectado. Los valores  $\Psi_P$  de AR-CT fueron significativamente más altos que los del control al mediodía. Por el contrario, los tratamientos nI mostraron una disminución significativa de los valores de  $\Psi_P$ , siendo AT-nI el que mostró los valores de  $\Psi_P$  más bajos, que fueron casi nulos al mediodía (Figura IV.11 C, D). En general, los mandarinos presentaron valores de  $\Psi_\pi$  más bajos y  $\Psi_P$  más altos que los pomelos.

**Figura IV.11** Potencial de turgencia de la hoja ( $\Psi_p$ ) (A, C) y potencial osmótico de la hoja ( $\Psi_\pi$ ) (B, D) antes del amanecer y mediodía para cada tratamiento (AT-CT: agua de trasvase-riego completo; AT-nI: agua de trasvase sin riego; AR-CT: agua regenerada-regada completamente; AR-nI: agua regenerada sin riego) y cultivo (pomelo y mandarina). Cada valor es la media de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Las barras denotan la desviación estándar de la media. Dentro de cada muestreo y cultivo, las letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según la prueba de Tukey. Los asteriscos indican diferencias significativas diferencias entre muestreos temporales para el mismo tratamiento según el ANOVA de medidas repetidas (\*\*\*  $p < 0,001$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*  $p < 0,05$ ).



De acuerdo con  $Y_{100s}$  (Tabla IV.5), se produjo una AO moderado con el tratamiento AR-nI (0,27 MPa) de los pomelos y de ambos tratamientos nI (0,25 y 0,15 MPa para AT-nI y AR-nI, respectivamente) del mandarina. En cuanto a los elementos fitotóxicos (Tabla IV.5), en pomelo no hubo diferencias significativas en los contenidos de Cl y Na entre tratamientos, aunque los valores tendieron a ser mayores en los árboles AR respecto al control (en un 29% y 32% para Cl y Na, respectivamente, en AR-CT; en un 48% para Na en AR-nI). En mandarina, los árboles AR aumentaron significativamente los valores de Cl (en un 255% y 205% para AR-CT y AR-nI, respectivamente) y Na (en un 52 y 59% para AR-CT y AR-nI, respectivamente) respecto al control, aunque sólo los cambios de Cl<sup>-</sup> fueron significativos.



**Tabla IV.5** Potencial osmótico foliar a plena turgencia ( $\Psi_{100s}$ ) al mediodía, ajuste osmótico (OA) y valores de elementos fitotóxicos foliares para cada tratamiento y cultivo (pomelo y mandarino). Cada valor es la desviación estándar media de 4 bloques recogidos a 248 DOY. Dentro de cada columna, las letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según la prueba de Tukey. AT-CT : agua de trasvase regado completamente; AT-nI : agua de trasvase sin riego; AR-CT : agua regenerada-regado completamente; AR-nI : agua regenerada-no regada.

	Tratamiento	$\Psi_{100s}$ (MPa)	OA (MPa)	Cl <sup>-</sup> (%)	Na <sup>+</sup> (%)
Pomelo	AT-CT	-1.59±0.13a	-	0.44±0.02a	0.050±0.005a
	AT-nI	-1.45±0.11a	-0.14	0.32±0.11a	0.036±0.004a
	AR-CT	-1.39±0.21a	-0.20	0.57±0.02a	0.066±0.026a
	AR-nI	-1.86±0.01b	0.27	0.40±0.28a	0.074±0.038a
Mandarino	AT-CT	-1.73±0.11a		0.18±0.02a	0.046±0.010a
	AT-nI	-1.98±0.08b	0.25	0.15±0.07a	0.055±0.020a
	AR-CT	-1.69±0.10a	0.04	0.64±0.08b	0.070±0.009a
	AR-nI	-1.88±0.03ab	0.15	0.55±0.05b	0.073±0.006a

La conductancia hidráulica de las plantas se vio significativamente afectada por la cantidad de agua. En los pomelos hubo una disminución significativa en  $K_{raiz}$  de los dos tratamientos nI (AT-nI y AR-nI ) y en  $K_{dosesl}$  de AR-CT , con respecto al control (Tabla IV.6). En el mandarino, se produjo una importante disminución en el  $K_{raiz}$  en ambos tratamientos nI (AT-nI y AR-nI ) y en el  $K_{dosesl}$  de AT-nI respecto al control.

**Tabla IV.6** Conductancia hidráulica del tallo de la raíz ( $K_{raiz}$ ) y conductancia hidráulica del dosel ( $K_{dosel}$ ) para cada tratamiento y cultivo (pomelo y mandarina). Cada valor es la media de la desviación estándar de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Dentro de cada columna, las letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según la prueba de Tukey. En el ANOVA de dos vías, incluyendo la calidad del agua ( $Q_w$ ) y cantidad ( $A_w$ ) como factores, \*\*\*  $p < 0,001$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*  $p < 0,05$ ; ns: no significativo. AT-CT : Agua de trasvase-regada completamente; AT-nI : Agua de trasvase-no regada; AR-CT : Agua regenerada-regada completamente; AR-nI : agua regenerada; AR-nI : agua regenerada-no regada.

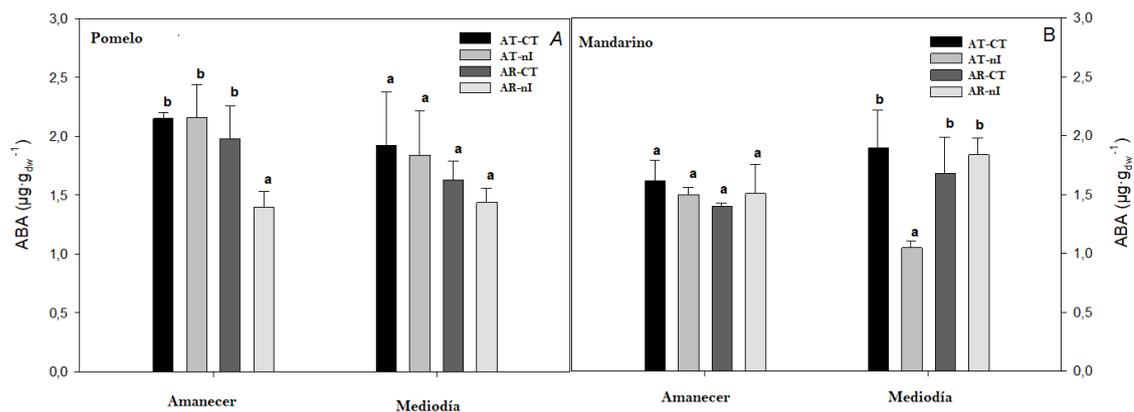
	Tratamiento	$K_{raiz}$ ( $\text{mol}\cdot\text{MPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$K_{dosel}$ ( $\text{mol}\cdot\text{MPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
Pomelo	AT-CT	4.51±0.28b	8.93±1.81b
	AT-nI	2.89±0.29a	8.47±2.26b
	AR-CT	4.54±0.22b	4.26±0.93a
	AR-nI	2.23±0.20a	9.65±3.20b
ANOVA	$Q_w$	ns	ns
	$A_w$	*	*
	$Q_w * A_w$	ns	*
Mandarino	AT-CT	4.87±0.81b	2.47±0.81b
	AT-nI	0.69±0.11a	1.51±0.23a
	AR-CT	5.30±0.38b	2.48±0.43b
	AR-nI	0.86±0.18a	2.41±1.26b
ANOVA	$Q_w$	ns	ns
	$A_w$	***	**
	$Q_w * A_w$	ns	ns

En todos los tratamientos en el cultivo del pomelo,  $K_{dosel}$  fue mayor que  $K_{raiz}$  (los valores medios fueron de 7,8 y 3,5  $\text{molMPa}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  para el  $K_{dosel}$  y el  $K_{raiz}$ , respectivamente). Por el contrario, en los mandarinos los valores medios de  $K_{raiz}$  fueron ligeramente superiores a los de  $K_{dosel}$  (2,9 y 2,2  $\text{molMPa}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  para el tallo de  $K_{raiz}$  y  $K_{dosel}$ , respectivamente). En general, la conductancia hidráulica del cultivo de mandarina fue inferior a la del cultivo de pomelo, y los árboles de mandarina también se vieron más afectados por el estrés hídrico que los de pomelo. En el pomelo, los valores de  $K_{raiz}$  se redujeron en un 35,9 y 50,5% para AT-nI y AR-nI, respectivamente. En el mandarina, los valores de  $K_{raiz}$  y  $K_{dosel}$  se redujeron en un 85,2 y 38,7% para AT-nI y en un 82,3 y 2,4% para AR-nI, respectivamente, frente al control.



En cuanto al ABA de los pomelos, AR-nI dio lugar a valores inferiores al resto de los tratamientos en ambos puntos de muestreo, aunque sólo fueron significativos antes del amanecer. En los mandarinos, el contenido de ABA fue significativamente menor para AT-nI al mediodía (Figura IV.12A, B); por lo tanto, se observaron menores niveles de ABA para los tratamientos más de estresados (AR-nI en pomelo y AT-nI en mandarina, Figura IV.12A, B).

**Figura IV.12** Contenido de ABA en las hojas de pomelo (A) y mandarina (B) y para cada tratamiento (AT-CT: transferencia de agua de trasvase; AT-nI: agua de transferencia-no regada; AR-CT: agua regenerada-regada; AR-nI: agua regenerada-no regada). Cada valor es la media de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Las barras indican las desviaciones estándar de la media. Dentro de cada muestreo y cultivo, letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , evaluadas mediante el test de Tukey.



## 2.2. Relación entre los estomas y los factores ambientales y fisiológicos de la planta

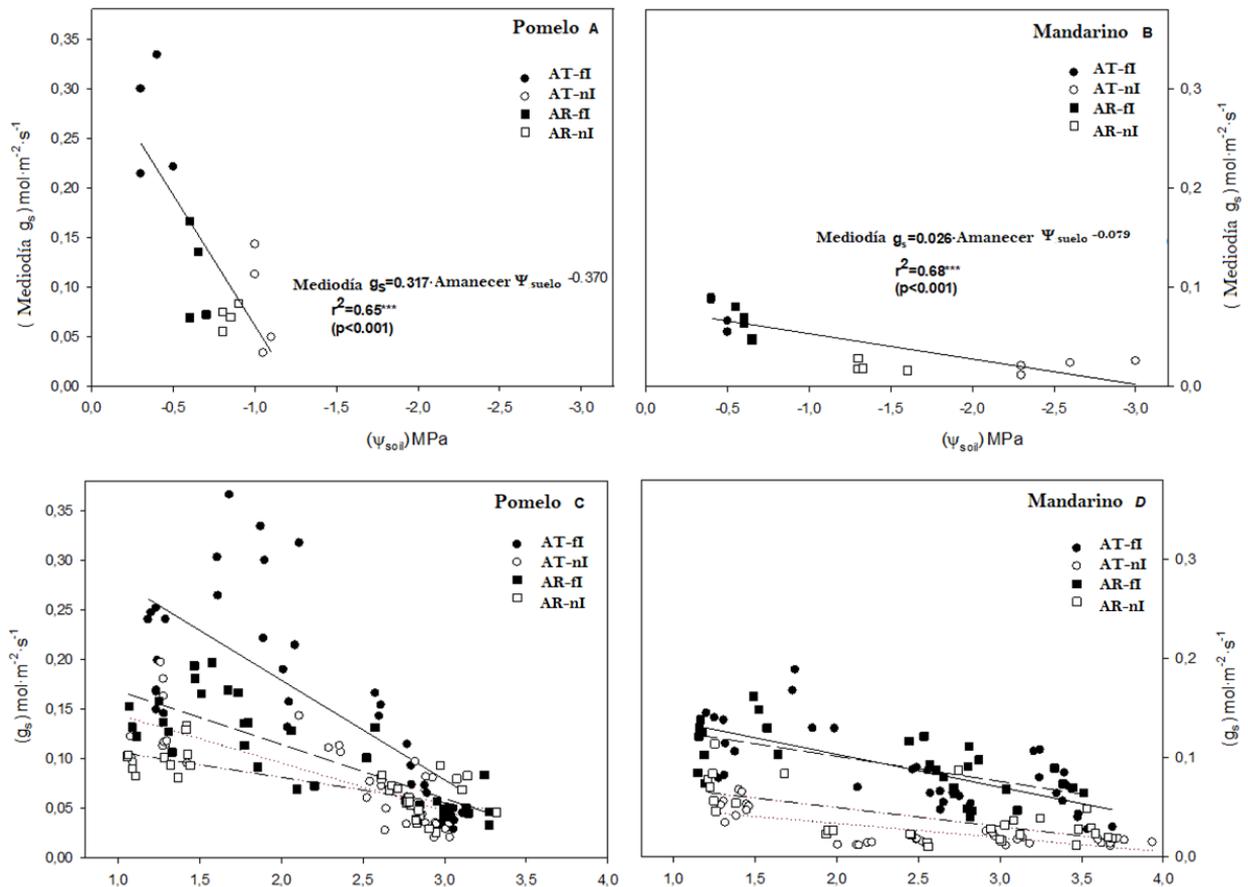
Se han estudiado múltiples variables que pueden influir en la respuesta estomática, que se clasifican aquí como ambientales (contenido de agua del suelo y DPV) y fisiológicas (no hidráulicas o hidráulicas). El grupo de variables no hidráulicas incluye señales químicas como el ABA, mientras que el grupo de variables hidráulicas incluye  $\Psi_1$ ,  $T_1$ ,  $Y_p$ ,  $\Psi_P$  y  $K$ .

En cuanto a los factores ambientales, encontramos que la  $g_s$  estaba significativamente correlacionado con el  $\Psi_{\text{suelo}}$  ( $p < 0,001$ ) (Figura IV.13 A, B) y el DPV ( $p < 0,001$ ) (Figura IV.13 C, D) en ambos cultivos.

El gráfico de regresión lineal para los mandarinos mostró una pendiente más suave que la de los pomelos debido a: i)  $\Psi_{\text{suelo}}$  alcanzó valores muy negativos y ii) a la baja  $g_s$  del mandarino frente al de los pomelos. Las líneas de regresión entre  $g_s$  y DPV también mostraron diferentes pendientes según el tratamiento. En los pomelos, la pendiente fue significativamente mayor en el control que en el resto de tratamientos (AT-CT > AR-CT > AT-nI > AR-nI). Del mismo modo, las pendientes para el mandarino fueron más pronunciadas en los tratamientos CT que en los nI (AT-CT > AR-CT > AR-nI > AT-nI), siendo AR-CT y AT-CT bastante similares (0,033 y 0,025); por tanto, en ambos cultivos, el cierre estomático fue más sensible a las variaciones del DPV, principalmente cuando el agua del suelo el agua del suelo no fue un factor muy limitante. Cabe destacar que al graficar los datos de  $g_s$  y DPV medidos durante toda la temporada de crecimiento entre las 06.00 y las 08.00 GMT, no se encontraron correlaciones significativas entre los parámetros en ningún cultivo.



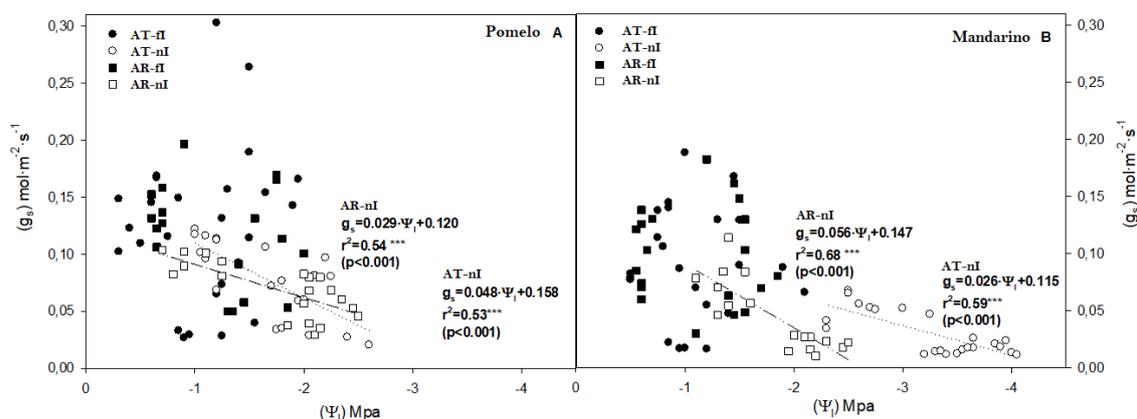
**Figura IV.13** Correlaciones entre la conductancia estomática del mediodía ( $g_s$  del mediodía) y los valores del potencial hídrico del suelo ( $\Psi_{\text{suelo}}$ ) (A, B) y entre la conductancia estomática ( $g_s$ ) y los valores de déficit de presión de vapor (DPV) (C, D) para cada tratamiento (AT-CT : agua de trasvase-riego completo; AT-nI : agua de trasvase-no riego; AR-CT : agua regenerada-regada completamente; AR-nI : agua regenerada-no regada) y cultivo (pomelo y mandarina). Cada punto es la media de los dos árboles centrales de cada bloque. Las líneas de regresión entre  $g_s$  y DPV para las plantas de pomelo fueron (C): AT-CT :  $g_s = 0,100 \text{ DPV} + 0,170$ ;  $r^2 = 0,53$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AT-nI :  $g_s = 0,049 \text{ DPV} + 0,223$ ;  $r^2 = 0,61$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-CT :  $g_s = 0,054 \text{ DPV} + 0,193$   $r^2 = 0,69$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-nI :  $g_s = 0,026 \text{ DPV} + 0,132$ ;  $r^2 = 0,52$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ). Las líneas de regresión entre  $g_s$  y DPV para las plantas de mandarina fueron (D): AT-CT :  $g_s = 0,033 \text{ DPV} + 0,170$ ;  $r^2 = 0,48$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AT-nI :  $g_s = 0,014 \text{ DPV} + 0,062$ ;  $r^2 = 0,55$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-CT :  $g_s = 0,025 \text{ DPV} + 0,152$   $r^2 = 0,42$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-nI :  $g_s = 0,019 \text{ DPV} + 0,088$ ;  $r^2 = 0,39$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ).



En cuanto a los factores fisiológicos de la planta, los resultados del ABA (factor no hidráulico) no se correlacionaron con  $g_s$  para ningún muestreo, tratamiento o cultivo. Con respecto a los factores hidráulicos fisiológicos, cuando la humedad del suelo no fue un factor limitante, independientemente de la calidad del agua, el  $\Psi_1$  no ejerció mucho control sobre  $g_s$  con el aumento diario del DPV.

Por el contrario, los tratamientos nI de ambos cultivos presentaron respuestas sensibles de  $g_s$  a los cambios de  $\Psi_1$  a lo largo del día (Figura IV.14 A, B).

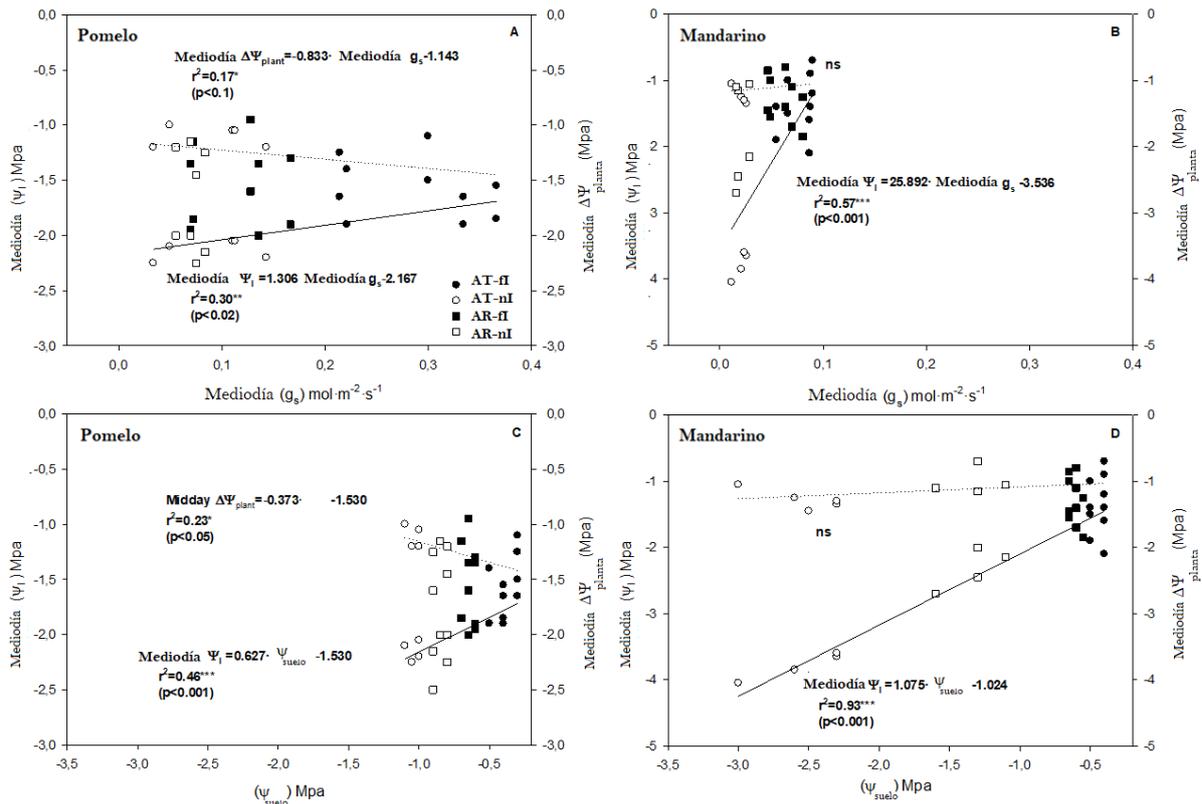
**Figura IV.14** Correlaciones entre los valores de conductancia estomática ( $g_s$ ) y potencial hídrico foliar ( $\Psi_1$ ) para pomelo (A) y mandarina (B) y todos los tratamientos. Cada punto es la media de los dos árboles centrales de cada bloque.



Cuando sólo se utilizaron los datos del mediodía, ambos cultivos mostraron correlaciones positivas y significativas entre el  $\Psi_1$  del mediodía y el  $g_s$  del mediodía ( $p < 0,02$  para el pomelo y  $p < 0,001$  para el mandarina) (Figura IV.15 A, B) y entre  $\Psi_1$  del mediodía y  $\Psi_{\text{suelo}}$  ( $p < 0,001$  ambos cultivos) (Figura IV.15 C, D); Sin embargo, el gradiente de potencial hídrico hidrodinámico (inducido por la transpiración) desde las raíces a los brotes ( $\Delta\Psi_{\text{Planta}}$ ) fue relativamente constante en el cultivo del mandarina. De hecho, la regresión lineal de la  $\Delta\Psi_{\text{Planta}}$  del mediodía frente a la  $g_s$  del mediodía o incluso a la  $\Psi_{\text{suelo}}$  produjo líneas completamente horizontales en los mandarinos (Figura IV.15 B, D). Este comportamiento no se observó en los pomelos (Figura IV.15 A, C).



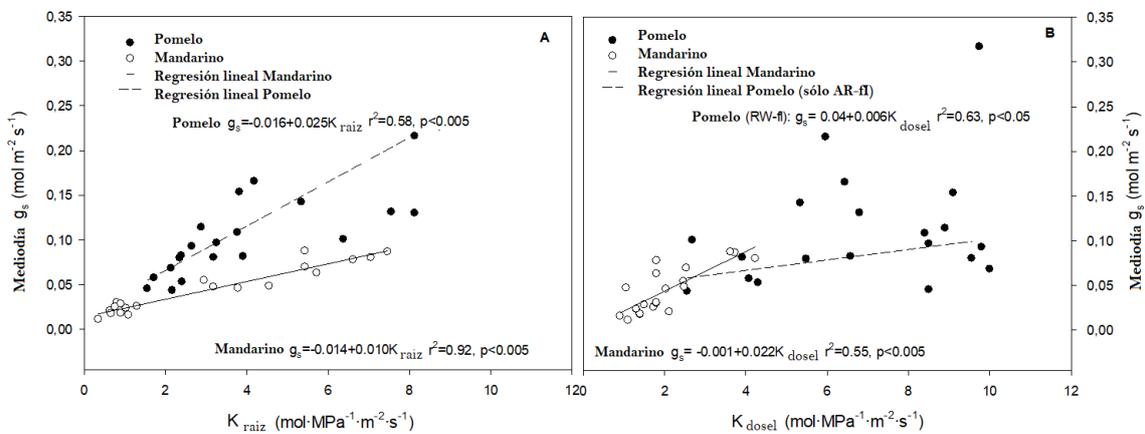
**Figura IV.15** Correlaciones del potencial hídrico foliar de mediodía ( $\Psi_1$  de mediodía) con la conductancia estomática de mediodía ( $g_s$  de mediodía) (líneas continuas), del gradiente de potencial hídrico hidrodinámico (inducido por la transpiración) de mediodía desde las raíces a los brotes (mediodía  $\Delta\Psi_{\text{planta}}$ ) con  $g_s$  de mediodía (líneas discontinuas) (A,B), y de  $\Psi_1$  de mediodía con el potencial hídrico del suelo ( $\Psi_{\text{suelo}}$ ) (líneas continuas) y de  $\Delta\Psi_{\text{planta}}$  con  $\Psi_{\text{suelo}}$  (líneas discontinuas) (C,D) para todos los tratamientos y ambos cultivos (pomelo y mandarina).



Se encontró una relación positiva entre  $g_s$  y  $T_1$  cuando sólo se representaron los datos por debajo de 30 °C ( $r^2 = 0,51$ ,  $p < 0,005$  y  $r^2 = 0,27$ ,  $p < 0,005$  para el pomelo y el mandarina, respectivamente). Esto se debió al hecho de que, de 20 a 30 °C, la DPV y  $T_1$  estaban correlacionadas linealmente, mientras que, de 30 a 40 °C, la DPV aumentó rápidamente y la  $g_s$  fue muy dispersa, dependiendo del tratamiento. En general, los valores de DPV y  $T_1$  fueron mayores en mandarina que en pomelo. Por último, también se estudió la respuesta estomática a la conductancia hidráulica a mediodía (Figura IV.16). En el pomelo, la  $g_s$  estuvo significativamente correlacionada con el tallo de  $K_{\text{raiz}}$  ( $r^2 = 0,58$   $p < 0,001$ ), mientras que, con el  $K_{\text{dosesel}}$ , esto fue cierto sólo para los árboles AR-CT ( $r^2 = 0,63$ ,

$p < 0,05$ ). En las plantas de mandarino,  $g_s$  se correlacionó tanto con el tallo  $K_{raiz}$  ( $r^2 = 0,92$ ,  $p < 0,001$ ) como con el  $K_{dospel}$  ( $r^2 = 0,55$ ,  $p < 0,001$ ). En todas las especies, se observó una correlación significativa entre  $g_s$  y  $K_{raiz}$  ( $r^2 = 0,50$ ,  $p < 0,001$ ), pero no para  $g_s$  y  $K_{dospel}$ .

**Figura IV.16** Correlaciones entre la conductancia estomática del mediodía ( $g_s$  del mediodía) y (A) la conductancia hidráulica del tallo de la raíz ( $K_{raiz}$ ) y (B) la conductancia hidráulica del dosel ( $K_{dospel}$ ) para cada tratamiento (AT-CT: transferencia de agua-regado completamente; AT-nI: agua de transferencia-no regada; AR-CT: agua regenerada-regada; AR-nI: agua regenerada-no regada) y cultivo (pomelo y mandarina).



## Discusión

### Relaciones hídricas de los cultivos de pomelo y mandarina bajo estrés hídrico y salino

El mandarino y el pomelo presentaron diferentes niveles de conductancia hidráulica. Algunos estudios reportaron datos de  $K$  para plantas de cítricos con diferentes portainjerto, pero utilizando plántulas (Syvertsen et al., 1985; Forner et al., 2011) o macetas (Martínez-Alcántara et al., 2013). La mayor capacidad hidráulica, principalmente de la copa, observada en el pomelo en comparación con el mandarino se explicó por los altos niveles de intercambio de gases foliares de acuerdo con Flexas et al. (2004), quien informó que las especies con gran capacidad fotosintética deben mostrar una alta capacidad hidráulica para hacer frente a los



altos valores de  $g_s$  requeridos para evitar las limitaciones disfuncionales a la fotosíntesis. Resultados similares fueron encontrados por Hernández-Santana et al. (2016) para plantas de almendro y olivo, dos especies con diferentes valores de  $K$ . Además, los valores de  $K_{raíz}$  fueron más vulnerables a la cavitación que los valores de  $K_{dosel}$  en ambas especies, en concordancia con Froux et al. (2005), que demostró que el segmento raíz-tallo es más propenso a este proceso. La depresión a mediodía observada en  $g_s$  es común en muchas especies de plantas (Grassi et al., 2009). Se ha asociado con variaciones en el estado hídrico del tallo al mediodía (Zhang et al., 2013), apoyando la idea de que la respuesta estomática a la DPV está fuertemente relacionada con las características hidráulicas de toda la planta, así como de la hoja (Brodrribb et al., 2008). Las limitaciones no estomáticas como la disminución de la conductancia del mesófilo al  $CO_2$  también puede ser parcialmente responsable de la depresión del mediodía, aunque no se ha demostrado que predomine (Flexas et al., 2008). En nuestro trabajo, cuanto mayor era el déficit hídrico, menores eran los valores de  $g_s$  encontrados y más temprano en la mañana se alcanzaba el máximo de  $g_s$ , en línea con (Schultz et al., 2003).

Las estrategias y los mecanismos de resistencia desarrollados por las plantas bajo las diferentes estrategias de riego dependieron del cultivo, describiéndose a continuación.

En el cultivo del pomelo, los árboles sometidos a estrés hídrico y previamente regados con trasvase, mostraron una reducción de 0,5 MPa en  $\Psi_{suelo}$ . Esto dio lugar a una caída del 35% en el valor de  $K_{raíz}$ , disminuyendo el  $\Psi_1$  y  $\Psi_\pi$ , así como el  $\Psi_P$  de la hoja con respecto al control, de acuerdo con Romero-Trigueros et al. (2017), afectando así al intercambio de gases. Cuando los árboles fueron regados completamente, pero con AR salino, el  $\Psi_{suelo}$  también se redujo, aunque en menor medida (0,3 MPa). En este caso, esto no se debió a las restricciones de agua, sino a la acumulación de sales en el suelo procedentes de la fuente de AR, que provocó un efecto osmótico en la zona de las raíces, dificultando la absorción de agua por parte de los árboles (Mounzer et al., 2013); sin embargo, a diferencia de AT-nI, esta caída del  $\Psi_{suelo}$  provocó la cavitación de los elementos conductores del dosel vegetal y la consiguiente pérdida de  $K_{dosel}$ , en línea con Corso

et al. (2020), que fue la principal causa de la disminución de  $g_s$  y que además estuvo relacionada con la toxicidad del Cl y del Na.

La reducción de  $g_s$  impidió en gran medida que  $\Psi_1$  y  $\Psi_\pi$ , se vieran afectados, de acuerdo con otros estudios en cítricos Nicolás. et al (2018), permitiendo que la turgencia de las hojas se mantuviera en niveles similares a los árboles de control. El hecho de que  $\Psi_1$  no disminuyera de forma apreciable con  $g_s$  demostró que los estomas respondían de forma rápida y lo suficientemente sensible a las señales hidráulicas como para lograr una casi homeostasis en  $\Psi_1$  (Buckley et al., 2019). En consecuencia,  $\Psi_1$  no fue un buen indicador del estado hídrico real de la planta para la programación del riego, a diferencia de otros frutales (Girona et al., 2006; Mirás-Ávalos et al., 2016).

En el tratamiento AR-nI del pomelo, la reducción de  $g_s$  fue un poco más pronunciada que para AT-nI, ya que la combinación de ambos estreses provocó mayores disminuciones de  $\Psi_{\text{suelo}}$  (reducción de 0,7 MPa) y de  $\Psi_1$  a lo largo del día, dando lugar a una importante pérdida de  $K_{\text{raiz}}$  debido a la cavitación y embolia de los vasos del xilema (Brodrribb et al., 2017). Los altos niveles de Na y Cl en los árboles de pomelo regados con AR, en comparación con el control, no afectaron al crecimiento vegetativo (volúmenes de dosel vegetal similares en todos los árboles, como se describió en (Pedrero et al., 2015; Romero-Trigueros et al., 2017) ni al rendimiento (Nicolás et al., 2018), lo que sugiere que este cultivo es un cítrico tolerante al estrés salino Yahmed et al.( 2015).

En el cultivo del mandarino, los árboles bajo supresión de riego (AT-nI) mostraron drásticas reducciones en los valores de  $\Psi_{\text{suelo}}$  (2 MPa menos que el control), mostrando un severo estrés hídrico con valores de  $\Psi_1$  muy negativos conseguidos mediante disminuciones de  $\Psi_\pi$ , de acuerdo con Patakas et al.(1997). Esto dificultó la captación de agua del sustrato, afectando a  $K_{\text{raiz}}$  y  $K_{\text{dosel}}$ , y provocando una fuerte reducción de  $\Psi_P$ , (~0 MPa). Esto condujo al abarquillamiento de las hojas, que es un mecanismo de resistencia que minimiza la pérdida de agua (Ocheltree et al., 2014), y, posteriormente al punto de marchitamiento con síntomas de defoliación. Con estos cambios, el intercambio de gases se redujo considerablemente.



Bajo la supresión del riego, los valores de  $\Psi_1$  disminuyeron mucho más en los árboles de mandarina que en los de pomelo debido a que las plantas de mandarina generalmente tienen menor conductancia hidráulica que las de pomelo, como se ha citado anteriormente. Otro estudio llevado a cabo en dos variedades de naranjas mostró que la variedad con una conductividad hidráulica más reducida presentó valores de potencial hídrico y  $g_s$  más negativos durante el mismo período de alta demanda evaporativa (Syvertsen et al., 1985). En cuanto a los mandarinos totalmente regados con AR salino (AR-CT), al contrario de lo observado en los pomelos, el intercambio gaseoso no se redujo por la calidad del agua porque el  $\Psi_{\text{suelo}}$ , la conductancia hidráulica de la planta y el  $\Psi_1$  no se vieron afectados. A pesar de que el  $\Psi_{\pi}$  disminuyó ligeramente en algún momento, la alta salinidad en las hojas no dio lugar a un efecto iónico específico, sino que pudo contribuir a aumentar la turgencia de las hojas frente al control. Aunque los datos del  $\Psi_{100s}$  no indicaron un AO importante en este tratamiento, cuando el  $\Psi_P$  de las plantas de cítricos en condiciones salinas es similar o superior al de los árboles control, la acumulación de Cl y Na representan procesos de OA, según (Pérez-Pérez et al 2007). Finalmente, al contrario de lo que se hipotetizó, el tratamiento nI pre condicionado por estrés salino (AR-nI) mantuvo un mejor estado hídrico durante el período de supresión de riego, ya que el  $\Psi_{\text{suelo}}$ , K y  $\Psi_1$  se redujeron mucho menos que en AT-nI. Esto se justificó porque el volumen del dosel de AR-nI fue menor que el de AT-nI. El portainjerto “*Carrizo citrange*” (mandarina) fue un excluyente de Cl y Na menos efectivo bajo condiciones de salinidad (Navarro et al., 2010); es decir, los árboles de mandarina no desarrollaron una estrategia para la eliminación de iones salinos de la fuente de AR como lo hicieron los árboles de pomelo, sino que optaron por una estrategia osmótica que involucra la acumulación de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  a nivel foliar, afectando al crecimiento vegetativo y al rendimiento (Nicolás et al., 2018). Además, los árboles AR-nI se aclimataron a la salinidad reduciendo la caída del potencial hídrico durante varios ciclos vegetativos para la misma parcela experimental, como se informó en Pedrero et al.(2014).

## **Relación entre la conductancia hidráulica y la relaciones hídricas: Comportamiento isohídrico o anisohídrico**

Los cítricos se consideran isohídricos en general, ya que suelen presentar una sensibilidad estomática a las condiciones de estrés hídrico (Mira-García et al., 2016). En estudios anteriores de las mismas parcelas experimentales, pero con riego deficitario controlado en lugar de supresión total del riego (Romero-Trigueros et al., 2014a; Pedrero et al., 2014; Pedrero et al., 2015; Nicolás et al., 2018; Romero-Trigueros et al., 2019), no hubo una completa priorización de la apertura estomática para el mantenimiento de la asimilación de CO<sub>2</sub>. Además, los valores de  $\Psi_s$  no variaron mucho a lo largo de varias temporadas de crecimiento para el mismo tratamiento ni entre tratamientos, indicando un posible comportamiento isohídrico típico. No obstante, hay que tener en cuenta que puede haber más de una definición de isohidricidad y que las diferentes definiciones no siempre están de acuerdo (Hochberg et al., 2018). En consonancia con el concepto presentado por Oren et al. (1999), ambas especies de cítricos mostraron una sensibilidad estomática al contenido de agua del suelo y a las demandas de evaporativas, aunque en diferente grado. Los pomelos mostraron mayor  $g_s$  de referencia ( $g_{sRef}$ , correspondiente a  $g_s$  a 1 kPa DPV) ( $g_{sRef} = 0,092 \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) que el mandarino ( $g_{sRef} = 0,078 \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), lo que sugiere que los pomelos tienden a tener una respuesta más sensible al aumento del DPV. Esta menor sensibilidad estomática del mandarino al DPV y al  $\Psi_{suelo}$  podría indicar un comportamiento menos isohídrico en comparación con el pomelo, según la teoría presentada en Grossiord et al. (2020). No obstante, una mayor regulación de la  $g_s$  para evitar la disminución del potencial hídrico hasta niveles que provoquen una excesiva pérdida de conductancia hidráulica no fue posible debido a los bajos niveles de intercambio gaseoso de los mandarinos, de acuerdo con Vogt (2001). El concepto de planta isohídrica presentado por Tardieu et al. (1998) implica una similitud en los valores de  $\Psi_1$  en las plantas nI y CT. Esto no ocurrió aquí en el cultivo del mandarino, en el que los valores de  $\Psi_1$  variaron en más de 1 MPa entre los tratamientos, indicando de nuevo que el cultivo del mandarino tuvo un comportamiento más anisohídrico en comparación con el cultivo de pomelo. La aparente simplicidad del concepto podría llevar a interpretar erróneamente la isohidricidad como un simple rasgo funcional o una estrategia definida por la



acción aislada de los estomas y no una respuesta de toda la planta para regular el estado hídrico (Hochberg et al., 2018).

En nuestro estudio, cuando el concepto de isohidricidad se evaluó dentro de una perspectiva global de toda la planta, encontramos que la regulación estomática mantenía gradientes internos de potencial hídrico relativamente constantes ( $\Delta\Psi_{\text{Planta}}$ ) en mandarino, mientras que al mismo tiempo permite que  $\Psi_1$  fluctúe intensamente en sincronía con  $\Psi_{\text{suelo}}$ . Este patrón de regulación hidráulica de los mandarinos fue definido como isohidrodinámico por Franks (2007).

Como el pomelo es isohídrico y el mandarino es más anisohídrico que el pomelo, pero también isohidrodinámico, éste no prioriza la apertura estomática, y por esta razón no encaja claramente en la definición de anisohídrico. Recientemente se han desarrollado marcos que vinculan matemáticamente la isohidricidad y la sensibilidad al DPV (Novick et al., 2019), pero esperan la validación empírica de la sensibilidad estomática al DPV en gradientes ambientales diarios (Grossiord et al., 2020). Las diferencias observadas aquí entre ambos cultivos de cítricos concuerdan con décadas de estudios que han destacado el hecho de que la sensibilidad estomática al DPV es muy variable entre especies (Cunningham et al., 2005; Creese et al., 2014; Gao et al., 2015). En general, encontramos una importante disminución de  $g_s$  con el aumento diario del DPV en todos los tratamientos, de acuerdo con otros autores (Shirke et al., 2004; Damour et al., 2010), aunque cuando se evaluó toda la estación de crecimiento, el DPV tuvo menos influencia en  $g_s$ . En cuanto al estrés hídrico, el cierre estomático a lo largo del día se correlacionó con  $\Psi_1$  además de con el DPV en las plantas de pomelo al no evitar por completo una disminución de  $\Psi_1$ , lo que también ocurrió en menor medida para las plantas del mandarino. No existe consenso en cuanto a los mecanismos exactos de detección que conducen a la respuesta de cierre estomático al aumento del DPV (Grossiord et al., 2020). Parte de la incertidumbre asociada a los impactos de la DPV en las plantas está relacionada con la dificultad de separar los efectos del DPV de los de la  $T_1$  (Novick et al., 2016). Además, pocos estudios han documentado la respuesta estomática directa al  $T_1$  (Mott et al., 2010). Aquí,  $T_1$  tuvo un efecto positivo en  $g_s$  sólo con  $T_1 < 30$  °C, de acuerdo con Grossiord et al.

(2020), que informó que cuando el DPV es baja y los estomas están completamente abiertos,  $T_1$  aumenta linealmente con el DPV.

Además, nuestros hallazgos en relación con la  $K$  pusieron de manifiesto el papel fundamental de la hidráulica de la planta para impulsar el cierre estomático (Zhang et al., 2013) en respuesta a un elevado DPV al mediodía y a una alta variación del agua en el suelo; es decir, los valores de  $K_{raiz}$  (en ambos cultivos) y  $K_{dosel}$  (en mandarino) estaban fuertemente relacionados con  $g_s$ . Hasta el momento, no hemos encontrado ningún estudio sobre cítricos con los portainjertos aquí estudiados, sobre riego con AR salino, o que incluya ensayos de campo. Sin embargo, otros estudios han reportado resultados en la misma dirección que los nuestros: la reducción de  $K$  a bajo potencial hídrico puede mejorar el cierre estomático durante la sequía (Rodríguez-Domínguez et al., 2016), mientras que, a mayores niveles de estrés hídrico,  $K_{hoja}$  (Hernández-Santana et al., 2016) o  $K_{planta}$  (Rodríguez-Gamir et al., 2019) disminuyen con una disminución concomitante de  $g_s$  (Corso et al., 2020). Con respecto a la salinidad, se ha reportado la disminución de  $K_{raiz}$  causada por el NaCl en naranja agria y mandarina Cleopatra (Zekri et al., 1989) y reducciones en  $K_{raiz}$  de plántulas de mandarina Cleopatra, Carrizo citrange y *Poncirus trifoliata* bajo tratamientos salinos a largo plazo (Rodríguez-Gamir et al., 2012).

La pérdida del funcionamiento hidráulico de la planta se ha considerado uno de los principales factores del cierre estomático recientemente (Rodríguez-Domínguez et al., 2020). En el pomelo, el hecho de que la  $g_s$  medida a mediodía estuviera mejor correlacionada con  $K_{raiz}$  que con  $K_{dosel}$  sugirió que las reducciones de  $g_s$  bajo estrés hídrico (tratamientos nI) ocurrieron en respuesta a ciertas señales basadas en la raíz o el tallo, en línea con Froux et al. (2005). Además, la sensibilidad de  $g_s$  a  $K_{raiz}$  fue 2,5 veces mayor en pomelo que en mandarino, en la que  $g_s$  respondió más sensiblemente a  $K_{dosel}$ .

El otro mecanismo principal considerado para desencadenar el cierre estomático es el aumento de señales químicas como el ABA (Dodd et al., 2005). La reducción del flujo de agua a través de algunas partes de las raíces, que podrían estar aisladas hidráulicamente debido al estrés hídrico severo, podría estar relacionada con una menor liberación de ABA de la raíz hacia el xilema de la hoja



(Liang et al., 1997). Esto explicaría por qué los valores más bajos de ABA en nuestro estudio se encontraron en el tratamiento AT-nI del mandarino. En este caso, el hecho de que  $g_s$  no se correlacionara con el ABA foliar sugería que la importancia del ABA en el control de  $g_s$  tenía menor peso que la conductancia hidráulica. Otros autores también encontraron que la relación del ABA con  $g_s$  no era significativa en condiciones de sequía en plantas de olivo (Hernández-Santana et al., 2016) y en cultivos de almendro, vid y olivo (Rodríguez-Domínguez et al., 2016).

### **Conclusiones**

El estrés hídrico y salino desencadenó cambios fisiológicos en los cítricos en respuesta al aumento del DPV y a la sequía del suelo a lo largo del día. No obstante, el grado de afectación y las estrategias fueron moduladas de forma diferente en función de la tolerancia al estrés del cultivo de cítricos y del portainjerto. En el pomelo, el uso de AR y la supresión del riego afectaron negativamente a la fisiología de la planta, siendo AR-nI el que más afectó al estado hídrico de la planta. En mandarino los árboles sometidos a estrés salino (AR-CT) acumularon sales, a diferencia del pomelo, como estrategia osmótica. La turgencia de las hojas mejoró y el intercambio de gases se mantuvo de forma similar al control. El tratamiento que más afectó al estado hídrico no fue AR-nI, como se esperaba, sino AT-nI. Este tratamiento presentó síntomas de lesión, similares a los de la senescencia, que fueron consecuencia del agotamiento del agua del suelo y de una caída crítica del  $\Psi_1$  que condujo a una pérdida severa de K. Este comportamiento no se observó con AR-nI porque hubo una ligera reducción del volumen de la copa como característica adaptativa, lo que sugiere que cuando los mandarinos sometidos a estrés hídrico estaban previamente aclimatados al estrés salino fueron más eficaces para evitar el efecto de la cavitación. Así, desde un punto de vista fisiológico (sin tener en cuenta el rendimiento de la fruta), los mandarinos toleraron menos la sequía que los pomelos, principalmente por sus bajos niveles de K.

Además, el cultivo de mandarino mostró un comportamiento más anisohídrico que el de pomelo, debido al notable descenso de  $\Psi_1$  bajo estrés hídrico. No obstante, desde la perspectiva global de la planta ( $\Delta\Psi_{\text{planta}}$ ), en el mandarino se encontró un patrón hidrodinámico constante más típico de los cultivos isohídricos, definiéndolo como isohidrodinámico. Además, el pomelo mostró un patrón isohídrico que limitó el uso de  $\Psi_1$  como indicador del estado hídrico de la planta. Aquí, el  $g_s$  sí se mostró como un buen indicador del estado hídrico para la programación del riego y se correlacionó negativamente con el incremento horario del DPV para ambos cultivos. Se necesitan más estudios centrados en la conductividad de la hoja para comprender el papel de la hidráulica y su mecanismo en la regulación estomática de los cítricos.



### **APARTADO 3. “Efectos del agua regenerada salina y el riego deficitario controlado en la calidad de los cítricos a medio-largo plazo”.**

#### **Resumen**

Las fuentes de agua no convencionales y las técnicas de ahorro de agua pueden ser de gran valor en regiones de clima árido y semiárido, aunque sus efectos a largo plazo sobre la calidad de los cítricos son poco conocidos. El objetivo de este estudio es evaluar la viabilidad de este tipo de aguas, comparando el riego a largo plazo con dos fuentes, el agua de trasvase (AT) y el agua regenerada (AR), combinados con dos estrategias de riego, al 100% de las necesidades hídricas del cultivo (CT) y riego deficitario controlado (RDC), regados al 50% de las necesidades hídricas del cultivo en la fase II de crecimiento del fruto.

Para la realización del ensayo se llevó a cabo el estudio de la calidad del fruto de mandarinas y pomelos durante ocho años, controlando los parámetros físico-químicos más relevantes en la comercialización, como son el peso, espesor de corteza (EC), contenido en azúcares, acidez e índice de madurez (IM). También se hizo un seguimiento de calidad del agua de riego de ambas fuentes, destacando parámetros físicos tan importantes como la conductividad eléctrica (CE), pH y químicos como  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{+}$ ;  $\text{K}^{+}$ ;  $\text{Na}^{+}$ ; B; Cl<sup>-</sup>;  $\text{NO}_3^{-}$ ;  $\text{PO}_4^{3-}$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Se observaron varios aspectos positivos con respecto al mandarino: i) El riego con AR dio lugar a una tendencia al aumento del peso del fruto con respecto a AT desde el inicio del ensayo, aunque dichas diferencias no fueron significativas en 2012, 2013 y 2014 debido a una disminución del espesor de la corteza; ii) Los tratamientos RDC (AR o AT) aumentaron CSS (sólidos solubles) y AT (ácido titulable) en el periodo más largo. Por otra parte, se observó un aspecto negativo: AR se asoció a una reducción del IM debido a que AT aumentó en mayor medida que CSS. No obstante, la fruta de este tratamiento cumplió las normas de calidad propuestas por la CEPE (Comisión Económica para Europa) durante los 8 años que duró el ensayo. En cuanto al pomelo, destacamos tres aspectos: i) Una tendencia al aumento de CSS que se traduce en una mejora del IM en los



tratamientos RDC, aunque dichas diferencias fueron significativas en años alternos: 2010, 2012 y 2014; ii) Ni RDC ni AR aumentaron la acidez del fruto; iii) Hubo una disminución significativa del EC en los últimos 2 años.

Como conclusión, podemos demostrar la viabilidad a medio y largo plazo del uso de AR y RDC para riego en cítricos. Sin embargo, debe realizarse con precaución y con un manejo adecuado para evitar efectos no deseados en la cosecha como resultado de la acumulación de elementos fitotóxicos.

### **Introducción y Objetivos**

Cuando hablamos de la calidad de fruta de los cítricos, los azúcares y los ácidos orgánicos son los principales metabolitos primarios en el zumo y son componentes importantes para la calidad interna de la fruta. El contenido de azúcares y ácidos orgánicos, así como la relación entre el contenido de azúcares y ácidos, afectan al sabor de los cítricos. La información sobre los efectos del agua salada en la calidad de la fruta en los cítricos es escasa y la mayor parte procede de experimentos en los que la sal no procede directamente de la fuente de agua como en el AR, sino que se inyecta en el sistema a partir de una solución concentrada de NaCl para obtener el tratamiento salino (Levy et al., 1979; Boman et al., 2001; Navarro et al., 2015).

El estudio que aquí se presenta está específicamente relacionado con la viabilidad a medio y largo plazo de la utilización de agua salina y estrategias para el riego en mandarinas y pomelos (2008-2015) y los efectos de estos tratamientos sobre parámetros de calidad de la fruta como el espesor de corteza, el peso de la fruta, los ácidos orgánicos y azúcares, que se encuentran entre los principales compuestos de la pulpa de los cítricos, cuyas concentraciones afectan en gran medida a las características de sabor y a la calidad organoléptica (Albertini et al., 2006).

La hipótesis de este apartado es que la estrategia RDC puede mejorar la calidad de la cosecha, debido principalmente al aumento del contenido de sólidos

solubles en el zumo. Por otro lado, el riego con aguas salinas (AR) puede afectar a la calidad de la fruta a medio y largo plazo, principalmente en mandarino, debido a que el portainjerto utilizado ("*Carrizo*" *Citrangé*), es menos tolerante a la salinidad que el portainjerto utilizado en pomelo (*Citrus Macrophylla*). Hasta donde se sabe, este es el primer estudio que compara, a medio-largo plazo, los parámetros de calidad de fruto en cítricos regados con aguas de diferente calidad agronómica (AR y AT), combinadas con estrategias de riego como el RDC.

## Materiales y métodos

### Área experimental, tratamientos de riego y calidad del agua

El experimento se llevó a cabo de 2008 a 2015 en una finca comercial situada en Campotéjar-Murcia, con dos cultivos. Uno de ellos consistía en mandarinos (*Citrus clementina* cv. '*Orogrande*'), plantados en el año 2000, injertados sobre citrange 'Carrizo' (*Citrus sinensis* [L.] Osb. × *Poncirus trifoliata* [L.]) y el otro cultivo consistía en pomelos "Star Ruby" (*Citrus paradisi* Macf) injertados en portainjertos de macrophylla (*Citrus macrophylla*) plantados en 2005. La parcela experimental se regó con dos fuentes de agua de calidad distinta desde (AT y AR) y el riego se programó en función de la evapotranspiración diaria del cultivo ( $ET_c$ ), siendo los tratamientos establecidos: **AT-CT; AR-CT; AT-RDC y AR-RDC** (Capítulo III).

Todos los árboles, independientemente del tratamiento recibieron las mismas cantidades de fertilizantes N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub> aplicados mediante un sistema de riego por goteo. En el caso del pomelo, en 2008 las cantidades de fertilizante fue de 122-61-88 kg ha·año<sup>-1</sup> y se incrementó aproximadamente un 10% cada año hasta 2010; de 2011 a 2015 (los pomelos ya se consideraban árboles adultos) las cantidades de fertilizante fueron 215-110-150 kg ha·año<sup>-1</sup>. En el caso del mandarino, de 2008 a 2015 las cantidades fueron de 215-100-90 kg ha·año<sup>-1</sup>.

Todos los árboles de mandarino se consideraron árboles adultos del período 2008-2015. Sin embargo, en el caso de los pomelos, se han considerado



dos periodos basados en el desarrollo de los árboles a lo largo de los 8 años del experimento: árboles jóvenes (2008-2010) y adultos (2011-2015).

La cantidad de agua aplicada al cultivo de mandarina fue de 625 y 539 mm·año<sup>-1</sup> para CT y RDC, respectivamente, en el periodo de medio plazo (2008-2011) y, 794 y 665 mm·año<sup>-1</sup> para CT y RDC en el periodo a largo plazo (2012-2015). En el caso del pomelo, la cantidad de agua aplicada fue de 386 y 337 mm·año<sup>-1</sup> para CT y RDC, respectivamente, a medio plazo (2008-2011), mientras que en el periodo a largo plazo (2012-2015) fue de 594 y 505 mm·año<sup>-1</sup> para CT y RDC, respectivamente. Por lo tanto, los tratamientos RDC ahorraron un 14.0 % y un 12.9 % en el caso del pomelo y la mandarina en el periodo a medio-plazo (2008-2011); 16.3 % y 14.9 % para el pomelo y la mandarina a largo-plazo (2012-2015) (Tabla IV.7).

**Tabla IV.7** Valores anuales de agua aplicada (mm·año<sup>-1</sup>) y ahorro de agua (%) para el periodo medio-plazo (2008-2011), largo-plazo (2012-2015) y periodo completo estudio (2008-2015) para cada tratamiento de agua (CT, tratamiento control; RDC, riego deficitario controlado).

Año	Pomelo			Mandarino		
	CT	RDC	(%)	CT	RDC	(%)
2008	224	193	14	526	447	15
2009	379	331	13	604	513	15
2010	356	309	13	590	501	15
2011	585	515	12	780	694	11
<b>2008-2011</b>	<b>386</b>	<b>337</b>	<b>13</b>	<b>625</b>	<b>539</b>	<b>14</b>
2012	599	521	13	809	683	15
2013	570	496	13	794	667	16
2014	614	518	16	819	684	16
2015	593	487	18	753	625	17
<b>2012-2015</b>	<b>594</b>	<b>505</b>	<b>15</b>	<b>794</b>	<b>665</b>	<b>16</b>

La calidad del agua de riego se determinó mediante análisis físico-químico. Para ello se llevó a cabo un seguimiento de los parámetros de conductividad

eléctrica ( $CE_a$ ) y sólidos disueltos totales (SDT), pH, y turbidez. También se realizó un seguimiento de la concentración de cationes y aniones en ambas fuentes de agua (Capítulo III).

### **Cosecha y calidad de los frutos**

En cada ciclo vegetativo se determinó en cada uno de los tratamientos (i) el número de frutos por árbol, (ii) el rendimiento en kilogramos totales por árbol, (iii) el peso de los frutos y (iv) la distribución de los frutos en diámetros comerciales. Se evaluaron ocho árboles interiores por tratamiento (dos árboles en cada repetición) para determinar la cosecha y el peso de los frutos. La recolección se hizo en función de la demanda comercial de los frutos, pudiendo haber una o varias cosechas según el año.

La calidad de la fruta se evaluó anualmente mediante la recolección aleatoria de 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Los parámetros evaluados fueron: el espesor de corteza (EC), contenido de zumo (CZ), contenido de sólidos solubles (CSS), acidez titulable ( $A_T$ ) y el índice de madurez (IM).

### **Diseño experimental y análisis estadístico**

Para cada cultivo se utilizaron un total de 32 árboles (ocho árboles por tratamiento). El experimento se organizó en bloques aleatorios con cuatro repeticiones por tratamiento y cada repetición constaba de tres filas con cuatro árboles cada una. Los dos árboles del centro de las de las filas centrales se utilizaron para las mediciones y el resto actuó como filas guarda. Los valores medios de cada muestreo se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA). Las regresiones lineales se calcularon usando Excel y para evaluar la significación de estas relaciones se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando SPSS (vers. 29.0 para Windows, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).



## Resultados y discusión

El periodo experimental se dividió en dos: el período medio-plazo (2008-2011) y el período largo-plazo (2012-2015) para una mejor comprensión de los resultados de ambos cultivos.

Con respecto al agua de riego, en general, se observaron diferencias significativas entre las fuentes AT y AR a lo largo del experimento. El AR tuvo la mayor salinidad y sodicidad con valores medios de  $CE_a$  en torno a  $3,5 \text{ dSm}^{-1}$  y la relación de adsorción de sodio (RAS) en torno a  $7,8 \text{ (meq}\cdot\text{L}^{-1})$ , mientras que AT tuvo valores más bajos,  $CE_a$  de  $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  y RAS de  $1.3 \text{ [meq}\cdot\text{L}^{-1}]$ . El AR también tuvo mayores concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , B y  $\text{Cl}^-$  que el AT (Tabla IV.8).

**Tabla IV.8** Análisis químico del agua de riego (conductividad eléctrica;  $CE_a$ , relación de absorción de sodio; RAS<sub>a</sub>, pH, cationes,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y aniones,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR) para el periodo 2008–2015. Valores medios para los 6 años, con  $n = 72$  (cada año  $n=12$ ).

Parámetro	Unidad	AT	AR
$CE_a$	$\text{dS m}^{-1}$	1.0a	3.5b
RAS <sub>a</sub>	$(\text{meq L}^{-1})^{0.5}$	1.3a	7.8b
pH		8.2a	7.8a
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{meq L}^{-1}$	4.3a	6.7b
$\text{Mg}^{+2}$	$\text{meq L}^{-1}$	3.2a	7.5b
$\text{K}^+$	$\text{mg L}^{-1}$	5.1a	42.7b
$\text{Na}^+$	$\text{meq L}^{-1}$	2.7a	20.7b
B	$\text{mg L}^{-1}$	0.1a	0.7b
$\text{Cl}^-$	$\text{meq L}^{-1}$	3.1a	18.6b
$\text{NO}_3^-$	$\text{mg L}^{-1}$	9.3a	21.2b
$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{mg L}^{-1}$	0.5a	2.0b
$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{meq L}^{-1}$	6.9a	16.2b

Con respecto al fruto, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos para los diferentes parámetros de calidad en los mandarinos. El peso

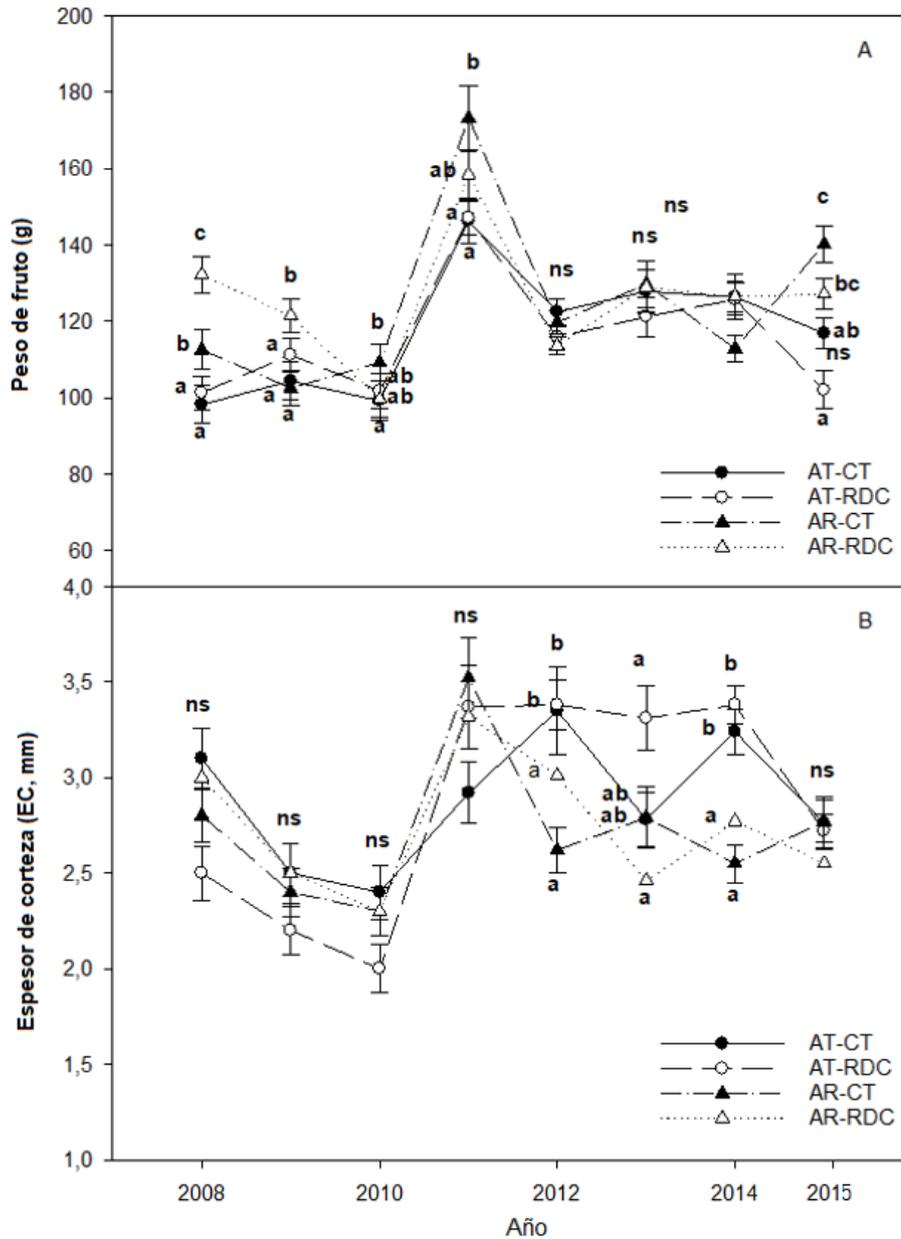
del fruto se incrementó significativamente con el riego con AR (CT o RDC) desde el inicio del ensayo (2008) y durante el periodo de medio plazo (Figura IV.17). Sin embargo, estas diferencias en el peso de los frutos no fueron significativas durante el (2012-2014) porque el EC (espesor corteza) se redujo significativamente en los tratamientos AR respecto al AT. En el período 2008-2011 no se observaron diferencias en el EC.

Ni el peso del fruto, ni el EC se vieron afectados por el riego deficitario cuando los árboles se regaron con el AT. En cuanto al rendimiento, los valores medios de AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC fueron 79.1, 74.8, 65.2 y 65.1 kg·árbol<sup>-1</sup> en el periodo (2008-2011), y 113.3, 106.2, 93.9 y 97.9 kg·árbol<sup>-1</sup> en el periodo a largo plazo (2012-2015).

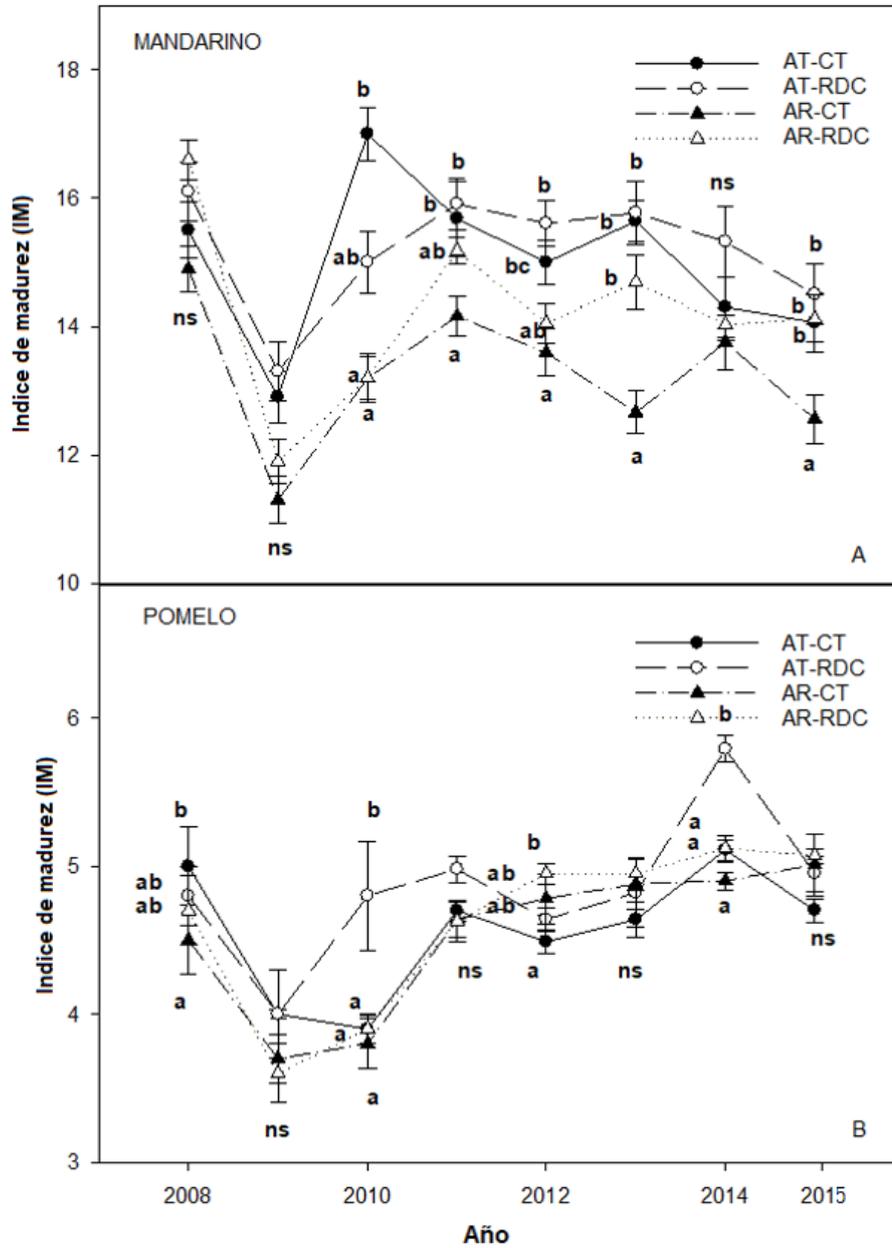
En cuanto al índice de madurez (IM), no se encontraron diferencias significativas en los árboles de mandarina para el tratamiento AR-CT frente al control en los dos primeros años (2008-2009) ni en 2014 (Figura IV.18). Sin embargo, en el resto de años (2010-2013 y 2015) los niveles de IM se redujeron significativamente por el riego con AR, principalmente porque el aumento de  $A_T$  (significativo en 2013 y 2015) fue mayor que el de CSS, en comparación con los árboles control. En cuanto a los tratamientos RDC se observó una tendencia a aumentar tanto el CSS como el  $A_T$  a lo largo de los años. Sin embargo, en AT-RDC prácticamente no hubo diferencias significativas en el IM respecto al control, ya que los valores de CSS y  $A_T$  se incrementaron simultáneamente. En AR-RDC, el IM disminuyó significativamente algunos años (2010, 2012 y 2013) ya que el  $A_T$  aumentó proporcionalmente más que el CSS. Para interpretar el comportamiento global durante todos los años de ensayo, los valores medios de CSS y  $A_T$  de todo el periodo (2008-2015) se calcularon para cada tratamiento. Los valores medios de CSS fueron  $8.9 \pm 0.3a$ ,  $9.4 \pm 0.4c$ ,  $9.2 \pm 0.3ab$  y  $9.3 \pm 0.4ab$  para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente.



**Figura IV.17** Peso del fruto (g) y Espesor de corteza (EC, mm) de mandarinos en el periodo 2008-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: riego con agua de trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado con agua trasvase, AR-CT: riego con agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario regulado con agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Dentro de cada año, letras diferentes indican diferencias entre tratamientos mediante el análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). ns significa que los tratamientos no son significativamente diferentes según test de Tukey ( $P < 0,05$ ).



**Figura IV.18** Índice de madurez (IM) de los frutos de mandarina y pomelo en el periodo 2008-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: riego con agua de trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado agua trasvase, AR-CT: riego agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Dentro de cada año, letras diferentes indican diferencias entre tratamientos mediante el análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). ns significa que los tratamientos no son significativamente diferentes según test de Tukey ( $P < 0,05$ ).





En el pomelo, al igual que en el mandarino, el riego con AR (CT o RDC) dio lugar a una tendencia al aumento del peso del fruto en a medio plazo (2008-2010, con árboles jóvenes) y en 2014 (Figura IV.19). Por lo demás, en general el riego deficitario no afectó el peso de los frutos, excepto en i) 2009 que el peso de los frutos aumentó en el AR-RDC porque su carga de cultivo era baja, y ii) 2010 (AT-RDC y AR-RDC) y 2015 (AR-RDC) que el peso del fruto disminuyó, aunque no afectó al rendimiento ni a la carga de cultivo (datos no mostrados).

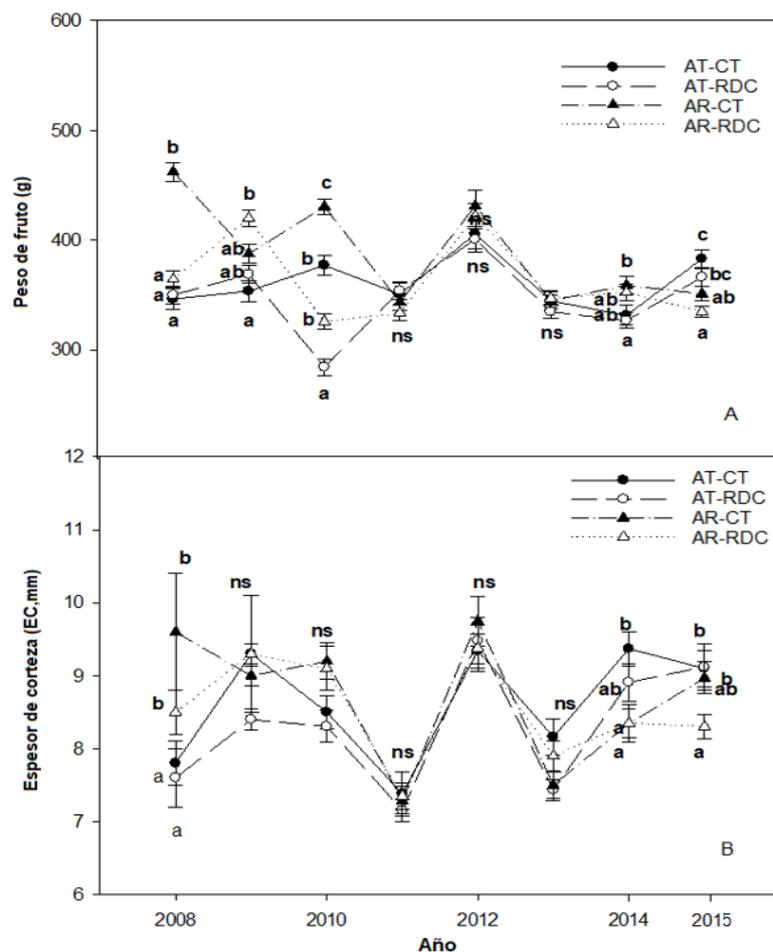
Por otra parte, el riego deficitario no afectó al peso de los frutos respecto a los árboles control, excepto i) en 2009 que los frutos de la AR-RDC aumentaron su peso, ya que la carga de frutos fue menor, y ii) en 2010 (ambos tratamientos RDC) y 2015 (AR-RDC) que disminuyó, aunque no afectó al rendimiento ni a la carga de frutos (datos no mostrados). Los pesos medios para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC fueron de 96.3, 89.5, 92.1 y 81.4 kg/árbol en el a medio plazo, y de 190.9, 175.6, 190.1 y 164.3 kg/árbol en el periodo a largo plazo. En cuanto al EC, se observó una tendencia creciente en los tratamientos AR con respecto a los AT durante la primera etapa a medio plazo (2008-2010, con árboles jóvenes), aunque dichas diferencias sólo fueron significativas en 2008. Esto estuvo directamente relacionado con el aumento del peso del fruto observado en ese mismo periodo. Durante el periodo 2011-2013, ni el AR ni el RDC afectaron a este parámetro.

Sin embargo, cuando el promedio de EC de los tres últimos años (2013-2015, con árboles adultos) fue calculado, un análisis ANOVA de dos vías utilizando la fuente de agua y la cantidad de agua como factores principales mostró que la salinidad del AR dio lugar a una disminución de la EC.

El IM no mostró una tendencia clara (Figura IV.18). Al analizar año por año, observamos un comportamiento alternativo a lo largo de todos ellos. En 2009, 2011, 2013 y 2015 no hubo diferencias significativas entre tratamientos; sin embargo, en 2008 IM disminuyó en el tratamiento AR-CT y en 2010, 2012 y 2014 aumentó en los tratamientos RDC (2012 en AR-RDC y 2010 y 2014 en AT-RDC). Estos cambios se asociaron a una disminución o un aumento de la CSS, ya que la  $A_T$  no varió entre los tratamientos a lo largo de los 8 años (Tabla IV.9 y IV.10).

Como se ha mencionado con respecto al mandarino, se determinaron los valores medios de CSS y  $A_T$  del periodo total (2008-2015) para interpretar el comportamiento global. El valor medio de CSS fue de  $11.9 \pm 0.4a$ ,  $12.5 \pm 0.5b$ ,  $11.9 \pm 0.4a$  y  $12.4 \pm 0.4b$  para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente. Con respecto a la  $A_T$ , los valores medios fueron  $1.9 \pm 0.1a$ ,  $1.9 \pm 0.1a$ ,  $2.0 \pm 0.1a$  y  $2.0 \pm 0.1a$  para AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC, respectivamente.

**Figura IV.19** Peso del fruto (g) y Espesor de corteza (EC, mm) de los pomelos en el periodo 2008-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: riego con agua de trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado agua trasvase, AR-CT: riego con agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado con agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Dentro de cada año, letras diferentes indican diferencias entre tratamientos mediante el análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). ns significa que los tratamientos no son significativamente diferentes según test de Tukey ( $P < 0,05$ ).





**Tabla IV.9** Contenido de sólidos solubles (CSS, °Brix) y ácido tritatable (A<sub>T</sub>, %) en el periodo intermedio 2008-2011 en los cuatro tratamientos (AT-CT: control agua trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado con agua de trasvase, AR-CT: control agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado con agua regenerada). Cada valor es la media ± SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por repetición). Dentro de cada año, letras distintas indican diferencias entre tratamientos mediante análisis ANOVA seguido de test de Tukey (P≤0,05).

Año	Tratamiento	MANDARINO		POMELO	
		CSS (°Brix)	A <sub>T</sub> (%)	CSS (°Brix)	A <sub>T</sub> (%)
2008	AT-CT	9.9±0.1c	0.8±0.1a	12.4±0.1a	1.9±0.1a
	AT-RDC	8.6±0.1b	0.8±0.1a	12.9±0.1a	1.8±0.1a
	AR-CT	7.9±0.0a	0.9±0.1a	13.4±0.0a	1.7±0.1a
	AR-RD	8.3±0.1b	0.8±0.1a	13.3±0.1a	1.8±0.1a
2009	AT-CT	8.1±0.9a	0.9±0.1a	11.6±0.9a	2.0±0.4a
	AT-RDC	9.6±1.0a	0.9±0.1a	12.0±1.0a	2.4±0.3a
	AR-CT	9.4±1.6a	1.0±0.1a	11.3±1.6a	2.5±0.5a
	AR-RD	9.2±1.1a	1.0±0.1a	11.9±1.1a	2.5±0.4a
2010	AT-CT	9.8±0.6ab	0.8±0.1a	13.6±0.6a	2.5±0.2a
	AT-RDC	10.6±1.3b	0.9±0.1a	13.5±1.3a	2.2±0.4a
	AR-CT	9.1±0.5a	0.9±0.1a	13.1±0.5a	2.4±0.2a
	AR-RD	10.0±1b	1.0±0.1a	13.2±1.0a	2.5±0.3a
2011	AT-CT	8.9±0.1a	0.8±0.1a	12.7±0.2ab	1.9±0.1a
	AT-RDC	8.8±0.1a	0.8±0.1a	12.9±0.2ab	1.8±0.1a
	AR-CT	9.8±0.1b	0.9±0.1a	12.3±0.2a	2.1±0.1b
	AR-RD	9.7±0.1b	0.9±0.1a	13.2±0.2b	2.1±0.1b
2008-2011	AT-CT	9.2±0.4a	0.8±0.1a	12.6±0.4a	2.1±0.2a
	AT-RDC	9.4±0.6a	0.8±0.1a	12.8±0.6a	2.0±0.2a
	AR-CT	9.0±0.5a	0.9±0.1a	12.5±0.6a	2.2±0.2a
	AR-RD	9.3±0.6a	0.9±0.1a	12.9±0.6a	2.2±0.2a

**Tabla IV.10** Contenido de sólidos solubles (CSS, °Brix) y ácido tritatable ( $A_T$ , %) en el periodo largo plazo 2012-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: control agua trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado con agua de trasvase, AR-CT: control agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado con agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por repetición). Dentro de cada año, letras distintas indican diferencias entre tratamientos mediante análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

Año	Tratamiento	MANDARINO		POMELO	
		CSS (°Brix)	$A_T$ (%)	CSS (°Brix)	$A_T$ (%)
2012	AT-CT	8.8 $\pm$ 0.2a	0.8 $\pm$ 0.1a	12.4 $\pm$ 0.3bc	2.0 $\pm$ 0.1a
	AT-RDC	9.1 $\pm$ 0.2ab	0.8 $\pm$ 0.1a	12.9 $\pm$ 0.1c	2.0 $\pm$ 0.1a
	AR-CT	9.5 $\pm$ 0.1b	0.8 $\pm$ 0.1a	11.5 $\pm$ 0.2a	2.1 $\pm$ 0.1a
	AR-RDC	9.1 $\pm$ 0.1ab	0.8 $\pm$ 0.1a	12.0 $\pm$ 0.1ab	1.9 $\pm$ 0.1a
2013	AT-CT	8.3 $\pm$ 0.4a	0.7 $\pm$ 0.1a	11.9 $\pm$ 0.2a	1.8 $\pm$ 0.1a
	AT-RDC	9.4 $\pm$ 0.4ab	0.9 $\pm$ 0.1b	13.6 $\pm$ 0.3b	1.9 $\pm$ 0.1a
	AR-CT	9.7 $\pm$ 0.2b	0.9 $\pm$ 0.1c	12.1 $\pm$ 0.3a	1.9 $\pm$ 0.1a
	AR-RDC	9.2 $\pm$ 0.3ab	0.9 $\pm$ 0.1b	12.7 $\pm$ 0.2ab	1.9 $\pm$ 0.1a
2014	AT-CT	8.4 $\pm$ 0.1a	0.8 $\pm$ 0.1a	11.3 $\pm$ 0.3a	1.7 $\pm$ 0.1a
	AT-RDC	9.4 $\pm$ 0.1b	0.8 $\pm$ 0.1a	12.0 $\pm$ 0.3ab	1.7 $\pm$ 0.1a
	AR-CT	8.4 $\pm$ 0.2a	0.8 $\pm$ 0.1ab	11.4 $\pm$ 0.3ab	1.8 $\pm$ 0.1a
	AR-RDC	8.7 $\pm$ 0.3a	0.9 $\pm$ 0.1b	12.4 $\pm$ 0.2b	1.8 $\pm$ 0.1a
2015	AT-CT	8.8 $\pm$ 0.1a	0.7 $\pm$ 0.1a	9.8 $\pm$ 0.3a	1.9 $\pm$ 0.1a
	AT-RDC	9.8 $\pm$ 0.2b	0.7 $\pm$ 0.1ab	10.6 $\pm$ 0.3bc	1.9 $\pm$ 0.1a
	AR-CT	9.7 $\pm$ 0.1b	0.8 $\pm$ 0.1b	10.0 $\pm$ 0.1ab	1.9 $\pm$ 0.1a
	AR-RDC	9.9 $\pm$ 0.1b	0.8 $\pm$ 0.1ab	10.9 $\pm$ 0.2c	1.9 $\pm$ 0.1a
2012-2015	AT-CT	8.6 $\pm$ 0.2a	0.7 $\pm$ 0.1a	11.3 $\pm$ 0.3a	1.8 $\pm$ 0.1a
	AT-RDC	9.4 $\pm$ 0.2b	0.8 $\pm$ 0.1ab	12.3 $\pm$ 0.3b	1.9 $\pm$ 0.1a
	AR-CT	9.3 $\pm$ 0.1b	0.9 $\pm$ 0.1b	11.3 $\pm$ 0.2a	1.9 $\pm$ 0.1a
	AR-RDC	9.2 $\pm$ 0.2ab	0.8 $\pm$ 0.1b	12.0 $\pm$ 0.2b	1.9 $\pm$ 0.1a



## **Discusión**

### **Calidad del agua de riego**

Cuando observamos los datos de las concentraciones de los elementos fitotóxicos Na, Cl y B en el AR, observamos que superaron los umbrales a partir de los cuales podrían observarse efectos perjudiciales para los cítricos  $\text{Na} > 5.0 \text{ meq l}^{-1}$ ,  $\text{Cl} > 6.7 \text{ meq l}^{-1}$  y  $\text{B} > 0.5 \text{ mg l}^{-1}$  (Grieve CM et al., 2012).

### **Respuesta del mandarino al riego con AR y RDC**

En nuestro estudio, el aumento de peso de la mandarina debido al riego con AR (CT o RDC) se asoció a una disminución de la producción total ( $\text{kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$ ) en un 15.4% a medio plazo y en un 12.6% a largo plazo. Además, el hecho de que el EC disminuyera en algunos años sin una reducción significativa del peso de la fruta con respecto a AT-CT se tradujo en un mayor contenido de zumo, como se observó en los tratamientos con AR (datos no mostrados). Otros autores evaluaron las respuestas de la mandarina 'Clemenules' injertada en el portainjerto de mandarina 'Cleopatra' al riego con agua salina a corto plazo (3 años) y no detectaron cambios en EC, como en los primeros años de nuestro trabajo, ni en el peso de los frutos, al contrario de nuestros resultados, lo que se explica por los diferentes portainjerto utilizados.

La reducción de IM observada en nuestro ensayo debido al aumento de  $A_T$  por el riego con AR estuvo de acuerdo con lo encontrado por Pérez-Pérez et al. (2016), el cual encontró un incremento de los niveles de  $A_T$  en el primer año del experimento que redujo el IM.

La tendencia al aumento tanto del CSS como de la  $A_T$ , observada en los tratamientos de RDC a lo largo de los años, también fue reportada por otros autores que informaron de un aumento de la  $A_T$  y, principalmente, del CSS, como resultado del déficit hídrico aplicado en mandarinos injertados en Cleopatra

(Conesa et al., 2014) y en Clementina de Nules injertada en 'Carrizo' citrange (Ballester et al., 2011).

### **Respuesta de los pomelos al riego con AR y RDC.**

El peso de los frutos del tratamiento AR (CT) no aumentó durante el periodo de larga-plazo debido principalmente a que su rendimiento no se vio afectado por el AR. El aumento del EC mostrado en los tratamientos AR en la primera etapa (2008-2010, con árboles jóvenes) fue similar a los encontrados por Pérez-Pérez et al. (2016) que determinaron las respuestas en una parcela de pomelo Star Ruby injertado sobre portainjerto Cleopatra al riego con agua salina a corto plazo (3 años).

No se encontró un efecto significativo para el IM, aunque la  $A_T$  no varió mucho entre los tratamientos a lo largo de los 8 años. Nuestros resultados no coinciden con los encontrados por Pérez-Pérez et al. (2016) que detectaron claramente un aumento del CSS y de la  $A_T$  en los 3 años para árboles regados con agua salina. Estos resultados diferentes podrían deberse a los portainjertos utilizados, que probablemente tendrían una fisiológica distinta, dando como resultado un comportamiento distinto ante un estrés por salinidad o un mayor nivel de estrés hídrico, con valores de tallo por debajo de  $-2,0$  MPa en comparación con los valores superiores a  $-1,0$  MPa observados en nuestro estudio (datos no mostrados). Se observó un ligero aumento del CSS, a veces acompañado de un aumento similar de la acidez, que la mayoría de las veces hizo que IM permaneciese sin cambios. Un aumento del CSS y de la  $A_T$  en los cítricos puede mejorar la calidad interna de la fruta porque estos parámetros influyen en el sabor de la misma. Sin embargo, este efecto tiene diferentes connotaciones dependiendo de si consideramos las mandarinas o los pomelos. En la mandarina, el aumento de CSS y  $A_T$  podría considerarse una mejora en la calidad de la fruta porque en condiciones semiáridas, los frutos de mandarina suelen tener una  $A_T$  baja, por lo que un aumento tanto de la CSS como de la  $A_T$  causado por los tratamientos RDC en nuestro estudio sin alterar el IM podría mejorar el sabor.



Sin embargo, en condiciones mediterráneas, los pomelos suelen tener una  $A_T$  elevada, por lo que, si la salinidad aumenta aún más el  $A_T$ , podría afectar negativamente a la aceptación del pomelo por parte de los consumidores. En este caso, durante los 8 años del ensayo, la  $A_T$  no se vio afectada por ningún tratamiento del pomelo en árboles jóvenes o adultos a medio o largo plazo. Este resultado es importante porque los zumos de pomelo son evaluados por la industria en base a su sabor.

### Comparación entre especies

El riego deficitario controlado dio lugar a una mejora de la calidad del rendimiento debido al aumento del CSS en ambas especies. Por otro lado, el riego salino (AR-CT) afectó más negativamente al IM de la mandarina que al pomelo porque el portainjerto utilizado en el pomelo (*Citrus macrophylla*) es un patrón más tolerante a la salinidad. El conocimiento de la tolerancia a la salinidad de los portainjertos de cítricos es fundamental para los productores porque sólo las plantaciones de cítricos tolerantes a la sal serán sostenibles.

Los frutos de todos los tratamientos también cumplieron las normas de calidad propuesto por la UNECE: una relación mínima de azúcar: ácido de 7:1 para mandarina y un contenido mínimo de azúcar  $>8$  °Brix para el pomelo. Considerando todo el período experimental (2008-2015), el riego con AR se tradujo en una disminución del rendimiento de los árboles de mandarina del 17.3% (CT) y del 15.3% (RDC) y el riego deficitario (AT-RDC) dio lugar a una disminución del 5.9%. Sin embargo, el rendimiento del cultivo de pomelo no se vio afectado por el AR (sólo disminuyó un 1.7% con CT) aunque cuando el AR se combinó con el RDC el rendimiento disminuyó en un 14.4% en los pomelos. Por lo tanto, se puede determinar que la mandarina injertada sobre *citrange* 'Carrizo' es más sensible al estrés salino que el pomelo injertado sobre *Citrus macrophylla*.

## Conclusiones

En regiones propensas a la sequía, como el sureste de España, la salinidad y la escasez de agua son graves problemas para los cultivos, y en especial para los cítricos. En este sentido, el agua de riego y la aplicación de diversas estrategias, son fundamentales para la sostenibilidad de los mismos, teniendo que buscar fuentes de agua alternativas como es el agua regenerada y estrategias como el riego deficitario controlado. En este estudio a largo plazo, se han querido estudiar los efectos del riego con AR salino y la aplicación de déficit hídrico en la calidad del fruto de mandarina y pomelo.

Se observaron varios aspectos positivos con respecto a la mandarina: i) El riego con AR dio lugar a una tendencia al aumento del peso del fruto con respecto a AT desde el inicio del ensayo, aunque dichas diferencias no fueron significativas en 2012, 2013 y 2014 debido a una disminución del espesor de corteza; ii) Los tratamientos RDC (AR o AT) aumentaron CSS y  $A_T$  en el período más largo estudiado. Por otra parte, se observó un aspecto negativo: AR se asoció a una reducción del IM debido a que la  $A_T$  aumentó en mayor medida que el CSS. No obstante, la fruta de este tratamiento cumplió las normas de calidad de calidad propuestas por la CEPE durante los 8 años que duró el ensayo.

En cuanto al pomelo, destacamos tres aspectos: i) Una tendencia al aumento del CSS que se traduce en una mejora del IM en los tratamientos RDC, aunque dichas diferencias fueron significativas años alternos: 2010, 2012 y 2014; ii) Ni RDC ni AR aumentaron la acidez del fruto; iii) Hubo una disminución significativa del EC en los últimos 2 años.

Con este estudio se demuestra la viabilidad a largo plazo de la utilización de estrategias de riego salino y en cuanto a la calidad de los frutos de los cultivos de mandarina y del pomelo. A pesar de esto, el riego con AR se debe realizar con cautela, ya que sólo tendrá éxito con medidas de gestión del riego y un seguimiento intensivo, que eviten la degradación del suelo y la toxicidad de las plantas por las sales. También sería interesante continuar este estudio en años futuros para



determinar otros efectos a largo plazo en los cultivos del uso de AR salino combinado con estrategias de RDC.

## ***APARTADO 4. “Efectos del agua regenerada salina y la alternancia de fuentes de agua en la cosecha y calidad de fruto en el cultivo del mandarino a medio-largo plazo”.***

### **Resumen**

El objetivo principal de este capítulo es estudiar la viabilidad del uso de AR en cítricos a medio largo plazo, concretamente en mandarino, junto con la aplicación de estrategias de alternancia de aguas de distinta calidad agronómica, con el objetivo de evaluar si es rentable y sostenible regar con un recurso hídrico no convencional durante el periodo estival, en el que AT es de muy difícil disponibilidad. Para ello, se dispuso de una fuente de agua considerada de buena calidad agronómica, como el agua procedente del trasvase Tajo-Segura (AT), con una conductividad eléctrica (CE) en torno a 1 dS/m y agua procedente de la EDAR Molina Norte (AR) con una CE en torno a 3-3,5 dS/m. Se ha llevado a cabo un seguimiento de los parámetros de calidad de agua ( $CE_a$  y  $RAS_a$ ), parámetros del suelo que puedan afectar directamente al desarrollo fisiológico de la planta ( $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ ), parámetros del estado hídrico de la planta ( $A$ ,  $g_s$ ), elementos fitotóxicos a nivel foliar, así como parámetros de producción y calidad de cosecha.

Para este trabajo se escoge el cultivo del mandarino, dado que, el uso de AR afecta tanto a nivel de planta, como al de producción y calidad de la cosecha (Nicolas et al 2016; Nicolas et al., 2017; Romero-Trigueros et al., 2019). Así pues, se pretende demostrar los posibles beneficios derivados del uso prolongado de AR, combinado con estrategias como la alternancia de ambas fuentes de agua, de manera que no influya negativamente en la fisiología de la planta, ni tampoco en la producción y la calidad de cosecha.

### **Introducción y objetivos.**

En este capítulo se estudia por primera vez el uso prolongado de AR salina en mandarino bajo condiciones de campo, junto con estrategias de alternancia de fuentes de agua en diferentes periodos a lo largo del año. A diferencia de otros estudios, no se reducen los aportes hídricos, sino que se van alternado las diferentes



fuentes de agua AT y AR, a lo largo del año. El cambio de fuente de agua se realizó en la fase II de crecimiento del fruto, coincidiendo con la mayor demanda evaporativa y de necesidades hídricas del cultivo. Así, con este tipo de estrategias, se reducirían las aportaciones del AT en periodos como el estival, donde la demanda y la tasa evaporativa es muy alta, consiguiendo un ahorro considerable.

El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos a medio largo plazo (2013-2018) en mandarino adulto de la aplicación de este tipo de estrategias sobre la producción y calidad de la cosecha. Dada la relevancia de los resultados, el periodo completo se dividió en dos subperiodos, un periodo a medio plazo (2013-2015) y un periodo a largo plazo (2016-2018). Este tipo de estudios es novedoso, ya que actualmente no existen referencias o citas bibliográficas con los que se pueda comparar o referenciar en condiciones o características similares.

## **Materiales y métodos**

### **Tratamientos de riego y calidad del agua de riego**

El ensayo se llevó a cabo en una finca comercial de cítricos, situado en el noreste de la región de Murcia, en Campotéjar. Se dispuso de una parcela experimental de 0,5 ha de mandarinos adultos de 14 años (*Citrus clementina* cv. 'Orogrande') injertados sobre citrange 'Carrizo' (*Citrus sinensis* (L.) Osb. *Poncirus trifoliata* (L.) (Capítulo III). La parcela se regó con dos fuentes de agua de calidad agronómica distinta (AT y AR) y el riego se programó en función de la evapotranspiración diaria del cultivo ( $ET_c$ ), siendo los tratamientos establecidos: AT-CT, AT-CT,  $AT_c$  y AR. La calidad del agua de riego se determinó mediante análisis físico-químico. Para ello se llevó a cabo un seguimiento de los parámetros de conductividad eléctrica ( $CE_a$ ), sólidos disueltos totales (SDT), pH, y turbidez. También se realizó un seguimiento de la concentración de cationes y aniones en ambas fuentes de agua (Capítulo III).

## Medidas de suelo y planta

Se tomaron muestras de suelo en todos los tratamientos estudiados, antes y después de la alternancia de fuentes de agua de riego (Capítulo III). Las muestras se cogieron a 30 cm de distancia del emisor y 30 cm de profundidad, coincidiendo con la zona de mayor concentración de raíces. La  $CE_s$  se determinó mediante la preparación de la pasta saturada, midiendo el extracto de la misma. A su vez, se determinaron los valores de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ , fundamentales en este tipo de estudios donde se usan fuentes de agua salina como AR.

Las medidas de intercambio gaseoso y muestreo de hoja se realizaron en los meses de junio y septiembre, coincidiendo con la fase II de acumulación de azúcares en el fruto y aumento de la tasa fotosintética de la planta. Los parámetros de intercambio gaseoso foliar (fotosíntesis neta  $[A]$  y conductancia estomática  $[g_s]$ ) se determinaron en días claros y en hojas adultas, completamente expandidas y del segmento medio de cada árbol.

Los parámetros  $A$  y  $g_s$  se determinaron con un equipo de fotosíntesis portátil equipado con una cámara de fluorescencia foliar con cubeta de 2 cm<sup>2</sup> y un inyector de CO<sub>2</sub> (Capítulo III). Las medidas fueron realizadas a una concentración de CO<sub>2</sub> de 400 ppm (similar a la concentración de CO<sub>2</sub> ambiental), una intensidad de luz saturante de 1200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y a temperatura y HR ambiental. El flujo de aire se ajustó a 300 ml·min<sup>-1</sup>. Las mediciones se realizaron en hojas expuestas a la luz solar entre las 8:00-10:00 GMT, dependiendo de la estación del año, dado que en dicho intervalo es cuando la  $g_s$  alcanza los valores más elevados y, además, se evitan temperaturas altas y baja HR, por lo tanto, existe un menor déficit de presión de vapor (DPV).

## Cosecha y calidad de fruto

En cada ciclo vegetativo, se determinó en cada uno de los tratamientos (i) el número de frutos por árbol, (ii) el rendimiento en kilogramos totales por árbol, (iii) el peso de los frutos y (iv) la distribución de los frutos en diámetros comerciales. La calidad de la fruta se evaluó anualmente mediante la recolección aleatoria de 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Los parámetros



evaluados fueron: el espesor de corteza (EC), el contenido de zumo (CZ), el contenido de sólidos solubles (CSS), la acidez titulable ( $A_T$ ) y el índice de madurez (IM).

### **Diseño experimental y análisis estadístico.**

El diseño experimental para cada tratamiento de riego incluyó 4 parcelas experimentales estándar distribuidas siguiendo un diseño completamente aleatorio. Cada réplica estaba compuesta por 12 árboles, organizados en 3 filas adyacentes. Se utilizaron un total de 192 mandarinos. Todas las mediciones se realizaron en los dos árboles centrales de la fila central de cada réplica (2 árboles por bloque, 8 por tratamiento), mientras que los árboles del borde se excluyeron del estudio para eliminar posibles efectos de borde.

Los valores medios de cada muestreo se interpretaron mediante un análisis de varianza (ANOVA). Las regresiones lineales se calcularon usando Excel y para evaluar la significación de estas relaciones se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando SPSS (vers. 29.0 para Windows, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

### **Resultados y discusión**

#### **Calidad de agua de riego y volumen aplicado.**

Se observaron diferencias significativas de calidad química entre el agua procedente del trasvase AT y la procedente de la depuradora AR durante todo el periodo 2013-2018. El AR se caracterizó por tener una mayor salinidad y sodicidad con valores medios de  $CE_a$  en torno a  $3.4 \text{ dSm}^{-1}$  y  $RAS_a$  de  $6.4 \text{ (meqL}^{-1})^{0.5}$ . Para AT se observaron valores más bajos de ambos parámetros,  $CE_a$  de  $1.1 \text{ dSm}^{-1}$  y  $RAS_a$  de  $1.3 \text{ (meqL}^{-1})^{0.5}$  (Tabla IV.12). El AR también presentó mayores valores de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{B}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que el AT.

Así mismo, se destaca que el AR superó los umbrales considerados límite, tanto para Na como para B y Cl, a partir de los cuales se podrían observar efectos perjudiciales para los cítricos:  $\text{Na} > 5.0 \text{ meqL}^{-1}$  (Bernstein et al., 1956),  $\text{Cl} > 6.7 \text{ meqL}^{-1}$  (Ayers y Westcot, 1985) y  $\text{B} > 0.5 \text{ meqL}^{-1}$  (Grieveet., 2012).

**Tabla IV.11** Análisis físico-químico del agua de riego (conductividad eléctrica;  $\text{CE}_a$ , relación de absorción de socio; RAS, pH, cationes,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^+$  y aniones,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{--}$  y  $\text{SO}_4^-$ ) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR) para el periodo 2013–2018. Valores medios  $\pm$  SE para los 6 años, con  $n = 72$  (cada año  $n=12$ ). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).

Parámetro	Unit	AT	AR
$\text{CE}_a$	dS m	1.1a	3.4b
RAS	$(\text{meq L}^{-1})^{0.5}$	1.3a	6.4b
pH		8.3a	7.8a
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{meq L}^{-1}$	4.4a	7.2b
$\text{Mg}^+$	$\text{meq L}^{-1}$	3.4a	8.0b
$\text{K}^+$	$\text{mg L}^{-1}$	6.4a	38.5b
$\text{Na}^+$	$\text{meq L}^{-1}$	3.4a	17.6b
$\text{B}^+$	$\text{mg L}^{-1}$	0.1a	0.6b
$\text{Cl}^-$	$\text{meq L}^-$	3.1a	16.8b
$\text{NO}_3^-$	$\text{mg L}^{-1}$	7.5a	16.7b
$\text{PO}_4^-$	$\text{mg L}^{-1}$	1.3a	2.4b
$\text{SO}_4^-$	$\text{meq L}^-$	5.7a	13.9b

Teniendo en cuenta la mayor concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{K}^+$  en AR e independientemente del programa de fertirrigación, el AR podría haber aportado un porcentaje en nutrientes para cubrir las necesidades del cultivo. Así pues, el uso de AR podría reducir significativamente el aporte de fertilizantes y sus costes asociados (Maurer y Davies, 1993; Pedrero et al., 2013).

La media de  $\text{ET}_0$  y precipitaciones para el periodo (2013-2015) fue de 1402 mm y 255 mm respectivamente; 1398 mm y 322 mm para el periodo (2016-2018) respectivamente; y 1400 mm y 288 mm para todo el periodo de estudio (2013-2018). Los tratamientos AT-CT y AR-CT recibieron la misma cantidad de agua,



789 mm·año<sup>-1</sup> en el periodo (2013-2015), 711 mm·año<sup>-1</sup> en el periodo (2016-2018) y 750 mm·año<sup>-1</sup>, respectivamente para la media global de todo el ensayo (2013-2018). El tratamiento AT<sub>c</sub> recibió 467 y 321 mm·año<sup>-1</sup> de AT y AR, respectivamente en el periodo (2013-2015); 321 y 428 mm·año<sup>-1</sup>, respectivamente en el periodo (2016-2018); y 447 y 321 mm·año<sup>-1</sup> en el periodo medio global (2013-2018) . El tratamiento AR<sub>c</sub> recibió 467 y 321 mm·año<sup>-1</sup> de AR y AT, respectivamente para el periodo medio plazo; 428 y 321 mm·año<sup>-1</sup> de AR y AT, respectivamente en el periodo largo-plazo (2016-2018); y 447 y 321 mm·año<sup>-1</sup>, respectivamente para todo el periodo experimental (2013-2018) (Tabla IV.13).

**Tabla IV.12** Valores medios anuales y valores medios del periodo (2013 a 2018); periodo medio-plazo (2013-2015) y largo plazo (2016-2018) de temperatura (T, °C), precipitación (P, mm), evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>, mm), volumen de agua aplicado (R, mm año<sup>-1</sup>) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR).

Año	T	P	ET <sub>o</sub>	R	AT <sub>c</sub>		AR <sub>c</sub>	
					AT	AR	AT	AR
2013	17	249	1394	794	459	336	336	458
2014	18	258	1431	819	490	328	328	490
2015	18	259	1381	753	453	299	299	453
<b>2013-2015</b>	<b>18</b>	<b>225</b>	<b>1402</b>	<b>789</b>	<b>467</b>	<b>321</b>	<b>321</b>	<b>467</b>
2016	18	449	1373	711	418	327	327	418
2017	18	204	1427	667	433	331	331	433
2018	18	321	1394	757	431	306	306	431
<b>2016-2018</b>	<b>18</b>	<b>322</b>	<b>1398</b>	<b>711</b>	<b>428</b>	<b>321</b>	<b>321</b>	<b>428</b>
<b>2013-2018</b>	<b>18</b>	<b>290</b>	<b>1400</b>	<b>750</b>	<b>447</b>	<b>321</b>	<b>321</b>	<b>447</b>

### Acumulación de sales en el suelo.

Las AR por sus características poseen un alto contenido en sales solubles, siendo en NaCl, la de mayor presencia (Rengasamy, 2018). Dadas las altas concentraciones de NaCl en el AR, la estructura del suelo puede dañarse si se

compara con AT (Assouline and Narkis, 2013; Bardhan et al., 2016; Levy and Assouline et al., 2010; Schacht and Marschner, 2015). Las AR también pueden presentar altas concentraciones de K (Laurenson et al., 2012), aumentando significativamente la concentración de los valores de  $CE_s$ , y  $CROSS_s$ . Esto puede darse, tanto en el tratamiento regado al 100% de la  $ET_c$  con AR, como en los tratamientos donde se alternan las fuentes de agua,  $AT_c$  y  $AR_c$ , en comparación con el tratamiento control AT-CT, siendo más destacable en verano que en invierno, debido a la mayor demanda hídrica del cultivo y una mayor tasa evaporativa.

Así, en invierno, los valores medios del periodo a medio plazo (2013-2015) de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  fueron significativamente más bajos en el tratamiento AT-CT que en el resto de tratamientos, dado su bajo contenido en sales (Tabla IV.13). Los valores significativamente más elevados de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  no se dan en el tratamiento con AR-CT, sino en el de  $AR_c$ . Aunque ambos tratamientos se riegan con AR, la estructura del suelo se encuentra menos degradada en  $AR_c$  dadas las características de la alternancia de fuentes de agua. En verano, al igual que en invierno para el período a medio plazo (2013-2015), el tratamiento AT-CT es el tratamiento que presenta los valores medios significativamente más bajos de los tres parámetros, comparado con el resto de tratamientos. En este caso, los valores significativamente más altos de  $CE_s$  los encontramos en los tratamientos AR-CT y  $AT_c$ , y los valores medios significativamente más alto de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  se observaron para el tratamiento AR-CT. Durante el período estival hay una mayor tasa evaporativa, produciendo un aumento de la concentración de sales en la solución del suelo. Todo ello, junto con una menor disponibilidad del agua para la planta dadas las características salinas del AR, hacen que AR-CT tenga los valores medios significativamente más altos de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ .

Para los valores medios del periodo a largo plazo (2016-2018), las tendencias son muy similares a las vistas para el medio-plazo, destacando los tratamientos regados con AR por encima de los regados con AT, tanto en el período invernal como estival. Los valores de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ , aumentan considerablemente independientemente del tratamiento, cuando se riegan con AR, dado su alto contenido en sales (Grattan et al., 2015; Bastida et al., 2017; Zolti et al., 2019). Los valores significativamente más bajos de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  se dan



en ambas estaciones para el tratamiento control AT-CT, ya que presenta un bajo contenido en sales en comparación con AR-CT. En invierno se observaron valores significativamente más altos de  $CE_s$ , y  $RAS_s$  para los tratamientos AR-CT y  $AR_c$ . En este caso, el tratamiento  $AR_c$ , es el que presentó los valores medios significativamente más altos de  $CROSS_s$ , debido a una mayor concentración de K, en relación con AR-CT, aumentando el valor del mismo. En verano se observaron los valores significativamente más altos de  $CE_s$  para los tratamientos AR-CT y  $AT_c$ , mientras que los valores medios significativamente más altos de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  se vieron en AR-CT, siguiendo la misma tendencia que en el periodo medio-plazo.

Para todo el periodo de estudio (2013-2018), la tendencia es muy similar a la observada para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Los valores significativamente más bajos de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ , se vieron en ambas estaciones para el tratamiento AT-CT, mientras que los valores más elevados de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ , se observaron en los tratamientos regados con el AR, destacando en invierno AR-CT y  $AR_c$ , y en verano, AR-CT y  $AT_c$ . En invierno dada la baja demanda evaporativa y una menor degradación del suelo,  $AR_c$  es el tratamiento que más sales acumula en el perfil del suelo, dando como consecuencia unos valores de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  mayores al resto de tratamientos. En verano, con el aumento de la tasa evaporativa y la menor disponibilidad del agua debido a la alta concentración de sales en la solución del suelo, hacen que AR-CT sea el tratamiento que presente los valores significativamente más altos de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ .

**Tabla IV.13** Conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada del suelo ( $EC_s$ ,  $dS\ m^{-1}$ ), relación de absorción de sodio ( $RAS_s$ ) y relación de cationes de la estabilidad estructural del suelo ( $CROSS_s$ ) para cada año (desde 2013 hasta 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Los valores son medias  $\pm$  SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Tukey's HSD test ( $P < 0.05$ ).

Año	Tratamiento	Invierno [Febrero]			Verano [Septiembre]		
		CE.	RAS.	CROSS.	CE.	RAS.	CROSS.
2013	AT-CT	1,8 $\pm$ 0,1a	2,8 $\pm$ 0,1a	3,9 $\pm$ 0,1a	2,3 $\pm$ 0,1a	2,9 $\pm$ 0,1a	3,2 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,9 $\pm$ 0,2b	6,0 $\pm$ 0,1b	8,6 $\pm$ 0,3c	5,9 $\pm$ 0,6b	6,6 $\pm$ 0,2b	10,5 $\pm$ 0,4c
	ATc	1,8 $\pm$ 0,1a	2,9 $\pm$ 0,1a	3,9 $\pm$ 0,1a	5,7 $\pm$ 0,6b	6,1 $\pm$ 0,1b	8,2 $\pm$ 0,4b
	ARc	3,8 $\pm$ 0,2b	5,9 $\pm$ 0,2b	7,9 $\pm$ 0,3b	2,3 $\pm$ 0,5a	2,9 $\pm$ 0,1a	3,3 $\pm$ 0,1a
2014	AT-CT	1,0 $\pm$ 0,1a	3,6 $\pm$ 0,1a	4,6 $\pm$ 0,2a	1,4 $\pm$ 0,2a	2,8 $\pm$ 0,1a	3,2 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	2,9 $\pm$ 0,3b	3,7 $\pm$ 0,1a	4,4 $\pm$ 0,2a	3,1 $\pm$ 0,4b	8,7 $\pm$ 0,2c	9,9 $\pm$ 0,4c
	ATc	1,6 $\pm$ 0,1ab	3,9 $\pm$ 0,1a	4,3 $\pm$ 0,1a	2,9 $\pm$ 0,3b	7,7 $\pm$ 0,2b	8,4 $\pm$ 0,4b
	ARc	3,3 $\pm$ 0,3b	7,6 $\pm$ 0,2b	8,9 $\pm$ 0,3b	1,8 $\pm$ 0,2a	2,7 $\pm$ 0,1a	3,1 $\pm$ 0,1a
2015	AT-CT	1,3 $\pm$ 0,1a	2,6 $\pm$ 0,1a	2,9 $\pm$ 0,1a	1,4 $\pm$ 0,1a	3,6 $\pm$ 0,1a	4,1 $\pm$ 0,2a
	AR-CT	2,5 $\pm$ 0,4b	3,0 $\pm$ 0,1b	3,7 $\pm$ 0,3a	3,1 $\pm$ 0,2b	6,2 $\pm$ 0,2c	6,1 $\pm$ 0,2c
	ATc	1,9 $\pm$ 0,1b	2,8 $\pm$ 0,1a	3,4 $\pm$ 0,2a	2,9 $\pm$ 0,3b	5,8 $\pm$ 0,1bc	6,6 $\pm$ 0,2d
	ARc	3,4 $\pm$ 0,2c	2,7 $\pm$ 0,1a	3,5 $\pm$ 0,2a	1,7 $\pm$ 0,2a	3,9 $\pm$ 0,1a	4,7 $\pm$ 0,2ab
2013-2015	AT-CT	1,3 $\pm$ 0,1a	3,0 $\pm$ 0,1a	3,8 $\pm$ 0,1a	1,7 $\pm$ 0,3a	3,1 $\pm$ 0,1a	3,5 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,1 $\pm$ 0,3b	4,2 $\pm$ 0,1b	5,5 $\pm$ 0,2b	3,9 $\pm$ 0,4b	7,1 $\pm$ 0,2c	8,8 $\pm$ 0,4c
	ATc	1,8 $\pm$ 0,1a	3,2 $\pm$ 0,1a	3,9 $\pm$ 0,2a	3,8 $\pm$ 0,3b	6,5 $\pm$ 0,1b	6,1 $\pm$ 0,2b
	ARc	3,5 $\pm$ 0,2b	5,4 $\pm$ 0,2c	6,5 $\pm$ 0,3c	1,9 $\pm$ 0,3a	3,2 $\pm$ 0,1a	3,7 $\pm$ 0,2a
2016	AT-CT	1,7 $\pm$ 0,2a	2,4 $\pm$ 0,1a	2,8 $\pm$ 0,1a	1,9 $\pm$ 0,2a	2,9 $\pm$ 0,1a	3,8 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,2 $\pm$ 0,6b	4,9 $\pm$ 0,1c	5,6 $\pm$ 0,2b	2,9 $\pm$ 0,4b	6,0 $\pm$ 0,4b	6,9 $\pm$ 0,3b
	ATc	1,6 $\pm$ 0,2a	3,4 $\pm$ 0,1b	5,6 $\pm$ 0,3b	2,9 $\pm$ 0,4b	5,7 $\pm$ 0,4b	6,6 $\pm$ 0,3b
	ARc	3,1 $\pm$ 0,5b	5,5 $\pm$ 0,2c	6,5 $\pm$ 0,4c	2,6 $\pm$ 0,3b	3,0 $\pm$ 0,2a	3,8 $\pm$ 0,3a
2017	AT-CT	1,6 $\pm$ 0,1a	3,0 $\pm$ 0,1a	3,7 $\pm$ 0,2a	1,3 $\pm$ 0,2a	3,5 $\pm$ 0,1a	4,0 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,0 $\pm$ 0,4b	6,5 $\pm$ 0,4b	7,4 $\pm$ 0,4b	3,0 $\pm$ 0,3b	8,6 $\pm$ 0,4c	9,8 $\pm$ 0,4c
	ATc	1,7 $\pm$ 0,2a	2,8 $\pm$ 0,1a	3,8 $\pm$ 0,3a	2,9 $\pm$ 0,3b	7,7 $\pm$ 0,2b	6,6 $\pm$ 0,3b
	ARc	3,3 $\pm$ 0,4b	7,5 $\pm$ 0,3c	8,8 $\pm$ 0,4c	2,0 $\pm$ 0,2ab	3,5 $\pm$ 0,3a	3,8 $\pm$ 0,3a
2018	AT-CT	1,7 $\pm$ 0,2a	1,5 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	1,6 $\pm$ 0,3a	2,3 $\pm$ 0,1a	3,1 $\pm$ 0,2a
	AR-CT	2,8 $\pm$ 0,3b	6,0 $\pm$ 0,1b	6,7 $\pm$ 0,1b	3,3 $\pm$ 0,4b	5,6 $\pm$ 0,2d	6,3 $\pm$ 0,2c
	ATc	1,8 $\pm$ 0,3a	1,8 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	3,1 $\pm$ 0,5b	4,7 $\pm$ 0,1c	5,5 $\pm$ 0,2b
	ARc	3,3 $\pm$ 0,5c	6,9 $\pm$ 0,3b	7,8 $\pm$ 0,2c	1,8 $\pm$ 0,2a	3,4 $\pm$ 0,2b	3,4 $\pm$ 0,3a
2016-2018	AT-CT	1,7 $\pm$ 0,2a	2,9 $\pm$ 0,1a	3,6 $\pm$ 0,1a	1,6 $\pm$ 0,2a	2,9 $\pm$ 0,1a	3,6 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,0 $\pm$ 0,4b	5,8 $\pm$ 0,2b	6,6 $\pm$ 0,2b	3,0 $\pm$ 0,4b	6,7 $\pm$ 0,3d	7,7 $\pm$ 0,3c
	ATc	1,7 $\pm$ 0,3a	2,7 $\pm$ 0,1a	3,9 $\pm$ 0,2a	3,0 $\pm$ 0,4b	6,0 $\pm$ 0,2c	6,2 $\pm$ 0,3b
	ARc	3,2 $\pm$ 0,4b	6,6 $\pm$ 0,3b	7,7 $\pm$ 0,2c	2,1 $\pm$ 0,2ab	3,3 $\pm$ 0,2b	3,7 $\pm$ 0,3a
2013-2018	AT-CT	1,5 $\pm$ 0,2ns	2,7 $\pm$ 0,1a	3,7 $\pm$ 0,1a	1,7 $\pm$ 0,2a	2,9 $\pm$ 0,1a	3,6 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,1 $\pm$ 0,3	5,1 $\pm$ 0,1b	6,1 $\pm$ 0,2b	3,4 $\pm$ 0,4b	6,8 $\pm$ 0,3c	8,2 $\pm$ 0,3d
	ATc	1,7 $\pm$ 0,2	2,9 $\pm$ 0,1a	3,9 $\pm$ 0,2a	3,4 $\pm$ 0,4b	6,2 $\pm$ 0,2c	6,9 $\pm$ 0,3c
	ARc	3,4 $\pm$ 0,3	6,0 $\pm$ 0,2c	7,1 $\pm$ 0,3c	2,0 $\pm$ 0,3a	3,3 $\pm$ 0,1b	4,7 $\pm$ 0,2b

### Fotosíntesis, intercambio gaseoso y productivid del agua.

Se realizaron medidas de intercambio gaseoso foliar (fotosíntesis [ $A$ ] y conductancia estomática [ $g_s$ ]) durante los meses de junio y septiembre, lo que nos permitió calcular la eficiencia del uso del agua (EUA), tanto para los tratamientos regados con AT como los regados con AR (Tabla IV.15).



Para el periodo medio-plazo (2013-2015), en junio, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. AR-CT presentó valores de EUA más bajos en comparación con el resto de tratamientos, aunque no significativamente. En septiembre, AR-CT fue el tratamiento con los valores significativamente más bajos de A ( $7,4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y  $g_s$  ( $0,07 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Altas concentraciones de B (Gimeno et al., 2012), Na y Cl (Navarro et al., 2011) en la solución del suelo, debido al uso de AR, pueden llevar a un cierre estomático de las hojas, dando como consecuencia una baja tasa de transpiración y reduciendo el  $\text{CO}_2$  disponible para realizar la fotosíntesis (García-Sánchez y Syvertsen, 2006). AR<sub>c</sub>, fue el tratamiento que presentó los valores significativamente más elevados de  $g_s$  ( $0,11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) debido a una mayor carga de frutos en el árbol. Se ha demostrado que la mayor carga de frutos provoca una estimulación de la actividad fotosintética de la planta y, por tanto, del intercambio gaseoso a nivel foliar, como es el caso del olivo (Pérez-Arcoiza et al., 2022).

En septiembre, para el mismo periodo, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en la EUA, aunque el tratamiento control (AT-CT) fue el que presentó los valores más elevados ( $111,4 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

Para el periodo a largo plazo (2016-2018), los valores más elevados de A y  $g_s$  en junio se dieron significativamente en el tratamiento AT<sub>c</sub> (A:  $4,4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $g_s$ :  $0,06 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), ya que, con el inicio del cambio de fuente de agua, el perfil del suelo no es capaz de retener la suficiente concentración de sales como para verse afectados negativamente A y  $g_s$ , siendo en consecuencia, el tratamiento con el mayor valor de éstos. Los valores más elevados de EUA ( $106,1$  y  $101,9 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), se dieron en los tratamientos AR-CT y AR<sub>c</sub> respectivamente, debido a una mayor reducción de  $g_s$  en comparación con la reducción de A. En septiembre, sin embargo, se dio un cambio de tendencia, ya que el tratamiento con el valor significativamente más alto de A y  $g_s$  se observó para AR<sub>c</sub> ( $10,2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  y  $0,11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), siendo AR-CT el tratamiento que presentó los valores significativamente más bajos (A:  $8,3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $g_s$ :  $0,08 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), asociado con una toxicidad de Cl y/o Na (Levy and Syvertsen et al., 2004). Para la EUA no se observaron diferencias significativas, siendo el tratamiento AR-CT el de mayor valor (4,2%) en comparación al tratamiento control.

Respecto al valor medio de todo el periodo de estudio (2013-2018), en junio, no se observaron diferencias significativas en ninguno de los parámetros estudiados. No obstante, el tratamiento AR<sub>c</sub> presentó los valores más elevados de A ( $5,8 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y los más bajos de  $g_s$  ( $0,05 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), por lo que fue el tratamiento con mayor EUA ( $112,4 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). En septiembre AR<sub>c</sub> fue el tratamiento con los valores significativamente más altos de A ( $10,2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y  $g_s$  ( $0,11 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), mientras que, por el contrario, el tratamiento AR-CT presentó los valores más bajos de A ( $7,87 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y  $g_s$  ( $0,08 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Es conocida la relación entre la calidad del agua de riego y las relaciones agua-planta (Paranychianakis et al., 2004), de manera que pueden afectar a la fisiología de la hoja (A y  $g_s$ ). Los valores más bajos de A y  $g_s$  para el tratamiento AR-CT son consecuencia de una mayor regulación estomática, provocado por el aumento de Na, Cl y B foliar, de acuerdo con numerosos autores como (García-Sánchez y Syvertsen, 2008; Romero-Trigueros et al., 2017).

A su vez, los patrones de cítricos pueden regular la cantidad de sales acumuladas en las hojas de la variedad (Levy y Syvertsen, 2004). De esta manera, la tolerancia de los cítricos a la salinidad depende principalmente del patrón, el cual determina la capacidad de absorción de iones fitotóxicos de la solución del suelo hacia la planta. El portainjerto utilizado en este ensayo, “*Carrizo Citrange*”, fue un excluyente de Cl y Na menos efectivo bajo condiciones de salinidad (Navarro et al., 2010), afectando a su capacidad fotosintética.

Como hemos podido observar, para todo el periodo de estudio 2013-2018, en septiembre, el tratamiento AR<sub>c</sub> presentó los valores más altos de A ( $10,2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y  $g_s$  ( $0,11 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), coincidiendo con los valores más bajos junto a AT-CT de RAS<sub>s</sub> (3,3) y CROSS<sub>s</sub> (4,7). Esto nos da a entender, como hemos dicho anteriormente que, durante el invierno, AR<sub>c</sub>, ha ido acumulando una mayor cantidad de Ca y K intracelular en hoja como respuesta al estrés salino, de manera que en verano, al producirse el cambio de fuente de agua, la planta no se encontraría sometida a dicho estrés, y, junto con esta mayor concentración de Ca



y K aumentaría la capacidad de  $g_s$ , y su capacidad fotosintética (A) (M. Olivares et al., 2023).

En septiembre, el tratamiento AR-CT fue el tratamiento que para el período de estudio 2013-2018 presentó los valores más bajos de A ( $7,87 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y  $g_s$  ( $0,08 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), coincidiendo con los valores más altos de RAS<sub>s</sub> (6,8) y CROSS<sub>s</sub> (8,2). El riego continuado con AR provoca una mayor presencia de NaCl en el perfil del suelo, impidiendo la presencia de otros elementos, aumentando los valores de RASs y CROSSs. Es por ello que los valores más bajos de A y  $g_s$  para el tratamiento AR-CT son consecuencia de una mayor regulación estomática, provocado por el aumento de Na, Cl y B foliar, de acuerdo con (García-Sánchez y Syvertsen, 2008; Romero-Trigueros et al., 2017).

**Tabla IV.14** Parámetros de fotosíntesis [ $A$ ] ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ) ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y eficiencia del uso del agua (EUA) ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018) y periodo completo (2013-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media  $\pm$  SE de ocho árboles (dos árboles por repetición). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).

Año	Parámetro	Junio			Septiembre		
		Tratamiento	A	$g_s$	EUA	A	$g_s$
2013	AT-CT	4,6 $\pm$ 0,5ns	0,05 $\pm$ 0,1ns	98,9 $\pm$ 7,9ns	7,2 $\pm$ 0,8ns	0,08 $\pm$ 0,1ns	86,9 $\pm$ 4,0ns
	AR-CT	5,1 $\pm$ 0,4	0,07 $\pm$ 0,1	80,6 $\pm$ 7,2	7,1 $\pm$ 0,9	0,09 $\pm$ 0,1	81,2 $\pm$ 8,4
	ATc	5,0 $\pm$ 0,5	0,06 $\pm$ 0,1	99,0 $\pm$ 10,1	8,5 $\pm$ 0,9	0,09 $\pm$ 0,1	96,8 $\pm$ 4,9
	ARc	4,3 $\pm$ 0,4	0,05 $\pm$ 0,1	97,1 $\pm$ 9,9	8,8 $\pm$ 0,7	0,12 $\pm$ 0,1	75,6 $\pm$ 5,6
2014	AT-CT	7,0 $\pm$ 0,6ns	0,06 $\pm$ 0,1ns	128,2 $\pm$ 8,6ns	10,7 $\pm$ 0,4b	0,08 $\pm$ 0,1a	131,4 $\pm$ 5,4b
	AR-CT	5,6 $\pm$ 1,1	0,05 $\pm$ 0,1	110,2 $\pm$ 12,8	9,1 $\pm$ 0,4ab	0,08 $\pm$ 0,1a	117,1 $\pm$ 11,9b
	ATc	5,8 $\pm$ 0,6	0,05 $\pm$ 0,1	137,6 $\pm$ 7,8	8,0 $\pm$ 0,7a	0,12 $\pm$ 0,1b	71,9 $\pm$ 7,4a
	ARc	7,8 $\pm$ 0,6	0,07 $\pm$ 0,1	124,9 $\pm$ 4,8	10,7 $\pm$ 0,3b	0,08 $\pm$ 0,1a	142,4 $\pm$ 6,9b
2015	AT-CT	7,5 $\pm$ 0,6ns	0,07 $\pm$ 0,1b	115,5 $\pm$ 5,1a	10,4 $\pm$ 0,4b	0,09 $\pm$ 0,1b	111,5 $\pm$ 2,6b
	AR-CT	6,3 $\pm$ 0,3	0,05 $\pm$ 0,1a	139,7 $\pm$ 3,9b	6,9 $\pm$ 0,5a	0,06 $\pm$ 0,1a	115,6 $\pm$ 3,5b
	ATc	7,8 $\pm$ 0,5	0,06 $\pm$ 0,1ab	125,4 $\pm$ 3,3ab	9,4 $\pm$ 0,4b	0,07 $\pm$ 0,1a	137,1 $\pm$ 1,3c
	ARc	6,9 $\pm$ 0,5	0,06 $\pm$ 0,1ab	120,5 $\pm$ 4,7a	10,7 $\pm$ 0,5b	0,14 $\pm$ 0,1c	84,2 $\pm$ 0,8a
2013-2015	AT-CT	<b>6,7<math>\pm</math>0,4ns</b>	<b>0,06<math>\pm</math>0,1ns</b>	<b>117,6<math>\pm</math>4,7ns</b>	<b>9,9<math>\pm</math>0,3b</b>	<b>0,09<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>111,4<math>\pm</math>2,7ns</b>
	AR-CT	<b>5,7<math>\pm</math>0,4</b>	<b>0,05<math>\pm</math>0,1</b>	<b>112,3<math>\pm</math>6,6</b>	<b>7,4<math>\pm</math>0,4a</b>	<b>0,07<math>\pm</math>0,1a</b>	<b>108,7<math>\pm</math>3,6</b>
	ATc	<b>6,2<math>\pm</math>0,4</b>	<b>0,05<math>\pm</math>0,1</b>	<b>127,5<math>\pm</math>5,2</b>	<b>8,8<math>\pm</math>0,4ab</b>	<b>0,09<math>\pm</math>0,1ab</b>	<b>108,8<math>\pm</math>5,2</b>
	ARc	<b>6,9<math>\pm</math>0,4</b>	<b>0,06<math>\pm</math>0,1</b>	<b>118,5<math>\pm</math>3,8</b>	<b>10,0<math>\pm</math>0,4b</b>	<b>0,11<math>\pm</math>0,1c</b>	<b>100,3<math>\pm</math>6,6</b>
2016	AT-CT	2,5 $\pm$ 0,1a	0,06 $\pm$ 0,1b	46,3 $\pm$ 6,6a	8,8 $\pm$ 0,7ns	0,09 $\pm$ 0,1ns	94,9 $\pm$ 5,2ns
	AR-CT	4,1 $\pm$ 0,2b	0,04 $\pm$ 0,1a	113,5 $\pm$ 9,0c	8,4 $\pm$ 0,7	0,09 $\pm$ 0,1	99,1 $\pm$ 7,1
	ATc	4,3 $\pm$ 0,1b	0,06 $\pm$ 0,1b	69,6 $\pm$ 0,9b	8,3 $\pm$ 0,4	0,10 $\pm$ 0,1	92,3 $\pm$ 8,6
	ARc	4,6 $\pm$ 0,1b	0,04 $\pm$ 0,1a	119,5 $\pm$ 2,4c	10,0 $\pm$ 0,8	0,11 $\pm$ 0,1	92,4 $\pm$ 3,3
2017	AT-CT	3,1 $\pm$ 0,1b	0,04 $\pm$ 0,1b	88,5 $\pm$ 12,6ab	9,6 $\pm$ 0,5ab	0,09 $\pm$ 0,1a	103,6 $\pm$ 4,0ab
	AR-CT	2,1 $\pm$ 0,1a	0,03 $\pm$ 0,1ab	68,7 $\pm$ 4,2a	7,8 $\pm$ 0,5a	0,08 $\pm$ 0,1a	113,0 $\pm$ 6,7b
	ATc	4,6 $\pm$ 0,1c	0,04 $\pm$ 0,1b	121,2 $\pm$ 8,3b	8,9 $\pm$ 0,3ab	0,09 $\pm$ 0,1a	105,0 $\pm$ 6,6ab
	ARc	1,7 $\pm$ 0,2a	0,03 $\pm$ 0,1a	59,0 $\pm$ 2,5a	10,4 $\pm$ 0,6b	0,12 $\pm$ 0,1b	87,3 $\pm$ 1,5a
2018	AT-CT	3,6 $\pm$ 0,3a	0,03 $\pm$ 0,1a	113,9 $\pm$ 7,9b	9,0 $\pm$ 0,4ab	0,09 $\pm$ 0,1a	104,3 $\pm$ 3,1b
	AR-CT	4,91 $\pm$ 0,22b	0,04 $\pm$ 0,001a	124,7 $\pm$ 9,9b	8,7 $\pm$ 0,4a	0,09 $\pm$ 0,1a	101,7 $\pm$ 5,3b
	ATc	4,55 $\pm$ 0,06ab	0,07 $\pm$ 0,001b	66,34 $\pm$ 0,81a	8,66 $\pm$ 0,36a	0,11 $\pm$ 0,01b	82,80 $\pm$ 5,31a
	ARc	3,80 $\pm$ 0,50ab	0,04 $\pm$ 0,01a	99,99 $\pm$ 7,38ab	10,27 $\pm$ 0,37b	0,10 $\pm$ 0,01ab	107,28 $\pm$ 3,63b
2016-2018	AT-CT	<b>3,02<math>\pm</math>0,15a</b>	<b>0,05<math>\pm</math>0,004b</b>	<b>77,92<math>\pm</math>7,90a</b>	<b>9,14<math>\pm</math>0,31ab</b>	<b>0,09<math>\pm</math>0,002ab</b>	<b>101,10<math>\pm</math>2,46ns</b>
	AR-CT	<b>3,87<math>\pm</math>0,22b</b>	<b>0,04<math>\pm</math>0,002a</b>	<b>106,06<math>\pm</math>6,81b</b>	<b>8,26<math>\pm</math>0,33a</b>	<b>0,08<math>\pm</math>0,004a</b>	<b>105,62<math>\pm</math>3,91</b>
	ATc	<b>4,41<math>\pm</math>0,08b</b>	<b>0,06<math>\pm</math>0,002c</b>	<b>78,70<math>\pm</math>3,98a</b>	<b>8,63<math>\pm</math>0,20a</b>	<b>0,10<math>\pm</math>0,004bc</b>	<b>93,39<math>\pm</math>4,25</b>
	ARc	<b>3,75<math>\pm</math>0,28b</b>	<b>0,04<math>\pm</math>0,002a</b>	<b>101,86<math>\pm</math>5,48b</b>	<b>10,25<math>\pm</math>0,33b</b>	<b>0,11<math>\pm</math>0,004c</b>	<b>95,44<math>\pm</math>2,27</b>
2013-2018	AT-CT	<b>5,29<math>\pm</math>0,33ns</b>	<b>0,06<math>\pm</math>0,004ns</b>	<b>102,68<math>\pm</math>4,88ns</b>	<b>9,56<math>\pm</math>0,23bc</b>	<b>0,09<math>\pm</math>0,002b</b>	<b>106,52<math>\pm</math>1,92ns</b>
	AR-CT	<b>4,81<math>\pm</math>0,25</b>	<b>0,05<math>\pm</math>0,003</b>	<b>109,23<math>\pm</math>4,75</b>	<b>7,87<math>\pm</math>0,25a</b>	<b>0,08<math>\pm</math>0,003a</b>	<b>107,06<math>\pm</math>2,83</b>
	ATc	<b>5,37<math>\pm</math>0,23</b>	<b>0,06<math>\pm</math>0,002</b>	<b>104,20<math>\pm</math>4,48</b>	<b>8,71<math>\pm</math>0,20ab</b>	<b>0,10<math>\pm</math>0,003b</b>	<b>99,68<math>\pm</math>3,40</b>
	ARc	<b>5,78<math>\pm</math>0,34</b>	<b>0,05<math>\pm</math>0,003</b>	<b>112,39<math>\pm</math>3,31</b>	<b>10,16<math>\pm</math>0,25c</b>	<b>0,11<math>\pm</math>0,004c</b>	<b>97,28<math>\pm</math>2,91</b>

## Elementos fitotóxicos

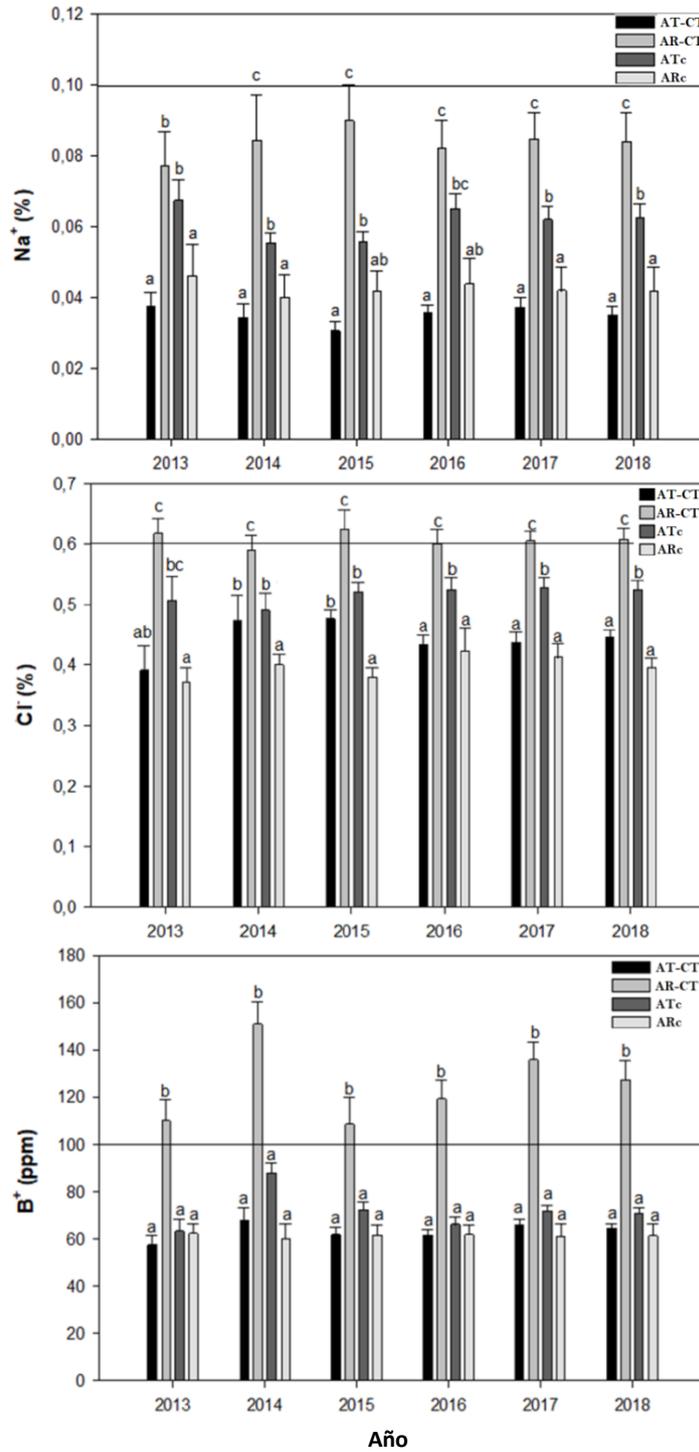
Se analizaron los niveles foliares de los elementos fitotóxicos durante la fase II del crecimiento del fruto (Figura IV.20). Existe una gran disparidad en relación a los umbrales fitotóxicos foliares para los cultivos de cítricos (Labanauskas y Bitters et al., 1974; Grattam et al., 2013). En este trabajo se utilizaron los valores límite establecidos según Romero-Trigueros et al. (2014a) para el cultivo del pomelo de Na, Cl y B a partir de los cuales la producción de la



cosecha se ve afectada: Na:  $0,1 \text{ g}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ , Cl:  $0,6 \text{ g}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$  y B: 100 ppm. Las diferentes especies de cítricos se comportan de distinta forma ante un estrés salino, siendo el portainjerto fundamental en la tolerancia (García-Tejero et al., 2010) a diferentes tipos de estreses, incluyendo el salino (Gimeno et al., 2012; Navarro et al., 2011). El uso de AR en cultivos con portainjetos menos tolerantes a la salinidad puede producir acumulación iones fitotóxicos (B, Na y Cl) en hoja. El portainjerto “*Carrizo Citrange*”, no se caracteriza por ser excluidor de sales (Navarro et al., 2010), de manera que el riego continuado con este tipo de aguas podría afectar de manera negativa a la fisiología de la planta (Nicolás et al., 2018).

Para todo el periodo de estudio (2013-2018), el tratamiento AR presentó las mayores concentraciones foliares de B, Na y Cl, al igual que en otros estudios (Romero-Trigueros., et al 2014; Nicolás et al., 2016). Estos valores fueron significativamente más elevados que AT-CT. En el caso del Na, en ningún año se alcanzaron los valores límite establecidos para la afectación de la cosecha, algo que sí ocurrió para el B, tal y como se observó en otro estudio (Abadía et al., 2021) a lo largo de todo el ciclo evaluado. Para todo el periodo de ensayo (2013-2018), se encontró una mayor concentración de Cl en hoja en AR-CT en comparación con el resto de tratamientos, tal y como se encontró en Nicolás et al. (2017), sobrepasando el umbral de toxicidad, excepto en el año 2014. Observando los valores de B, el resto de tratamientos se comportó de forma similar, no encontrándose diferencias significativas entre mismos, algo que no ocurre con Na y Cl, donde AT<sub>c</sub> presentó valores significativamente más altos en comparación con AT-CT y AR<sub>c</sub>, debido fundamentalmente por el riego con AR, aunque sin alcanzar los valores límite de toxicidad.

**Figura IV.20** Concentración de sodio (Na; %) , cloro (Cl; %) y boro (B; ppm) en mandarino para los distintos tratamientos regados con AT y AR. Para cada año los valores corresponden al valor medio del periodo comprendido entre junio y septiembre (n=4). Cada histograma representa la media de ocho árboles ± es. Las barras sobre el histograma indican las diferencias estadísticas entre los diferentes tratamientos de acuerdo con ANOVA ( $p \leq 0.05$ ) y test Tuckey HSD ( $P < 0.05$ ).





## **Crecimiento vegetativo y productivo**

Se observaron diferencias significativas entre tratamientos en los parámetros de crecimiento vegetativo en los valores medios para el periodo a corto plazo (2013-2015) y para el periodo a largo plazo (2016-2018), así como para todo el periodo de estudio (2013-2018) (Tabla IV.15).

En el periodo medio-plazo (2013-2015), se observó una tendencia de reducción del volumen del dosel vegetal (VD) no significativa del 12% para el tratamiento AR-CT con respecto al tratamiento AT-CT. Sin embargo, los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> no se vieron afectados.

En el periodo largo-plazo (2016-2018), de nuevo, el tratamiento AR-CT experimentó una reducción, aunque menor que a medio plazo, del 7% con respecto al tratamiento control AT-CT, pero no fue significativa. El tratamiento AR<sub>c</sub>, experimentó un crecimiento significativo del dosel vegetal del 10% respecto al tratamiento AT-CT, lo que podría estar directamente relacionado con los mayores valores observados de A y g<sub>s</sub> para el mismo tratamiento.

Para todo el período de estudio (2013-2018), el tratamiento AR-CT vio reducido su dosel vegetal un 10% de manera significativa respecto al tratamiento AT-CT, mientras que AR<sub>c</sub>, experimentó un aumento no significativo del 4% respecto a AT-CT.

Los resultados están en consonancia con otros trabajos de diversos autores (García-Tejero et al., 2010; Pedrero et al., 2013; Pérez-Pérez et al. 2015 y Nicolás et al., 2016), que encontraron que el riego con aguas regeneradas suele ocasionar a una reducción del dosel vegetal en cítricos.

Sin embargo, la aplicación de este tipo de estrategias en un patrón como es "Carrizo Citrange", mejoró la tolerancia a la salinidad en el ciclo de cultivo comparado con el tratamiento AR-CT, debido a la menor acumulación de elementos fitotóxicos (Figura IV.20). Aunque el patrón Carrizo no se caracteriza por ser excluidor de sales (Navarro et al., 2010), la alternancia de aguas no provocó una acumulación de iones fitotóxicos Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> a nivel foliar, como si se produjo en el tratamiento AR-CT. El riego continuado con aguas regeneradas afectó de manera negativa al crecimiento vegetativo de la planta (Nicolás et al., 2018),

mientras que la alternancia de aguas, contribuyendo de manera positiva al crecimiento del dosel vegetal.

Para el valor medio de cada uno de los periodos de estudio, se observaron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a la producción total (PT) (Tabla IV.15).

En el periodo a medio plazo (2013-2015), no se vieron diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo, AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> tendieron a aumentar su producción un 12% y 10% respectivamente con respecto al tratamiento AT-CT. El tratamiento AR-CT redujo su producción un 7% respecto a AT-CT aunque de manera no significativa.

En el periodo a largo plazo (2016-2018), las diferencias entre tratamientos fueron significativas con respecto al tratamiento control. Los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> aumentaron de manera significativa su producción un 18% y un 22% respectivamente, mientras que AR-CT redujo significativamente su producción un 23% respecto al tratamiento AT-CT (Tabla IV.15).

Para todo el periodo de ensayo (2013-2018), destacaron los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub>, aumentando su producción de forma significativa un 15% y un 17% respecto al tratamiento AT-CT, respectivamente, mientras que el tratamiento AR-CT, vio reducida su producción un 16% respecto a la del AT.

Tanto para el periodo medio y largo-plazo, como para todo el periodo (2013-2018), no se observaron diferencias significativas en el cociente entre la producción del árbol y el volumen del dosel vegetal (PT/VD), sin embargo, el riego prolongado con AR provocó una reducción de (PT/VD), debido a un menor volumen de la copa de los árboles, disminuyendo así la producción.

Análogamente a la producción total, la carga de frutos por árbol, al igual que ya se ha visto en otros estudios (Nicolás et al., 2016; Romero-Trigueros et al., 2017; Bastida et al., 2018) se vio afectada por el tipo de agua y la estrategia de riego aplicada (Tabla IV.15).

Para el periodo a medio plazo (2013-2015), aunque no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> aumentaron la carga de frutos un 20% y 8% respecto al tratamiento AT-CT, respectivamente, mientras que AR-CT vio reducida su carga un 11%.



En el periodo a largo plazo (2016-2018), si se observaron diferencias significativas en la carga de frutos. Los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub>, aumentaron la carga de manera significativa un 47% y un 21% respecto a AT-CT, respectivamente. Sin embargo, el tratamiento AR-CT redujo significativamente la carga un 26% respecto al tratamiento de AT-CT.

Para todo el periodo (2013-2018), igual que para el periodo largo-plazo, los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub>, aumentaron significativamente la carga de frutos un 35% y 16%, respectivamente respecto al tratamiento AT-CT. Así, el tratamiento que vio reducida significativamente la carga fue el AR-CT, con un 24% menos que el tratamiento de AT-CT.

Cuando se observan los valores de peso del fruto, los valores medios de los periodos a medio y largo plazo, no mostraron diferencias significativas. No obstante, se observó que en el periodo medio-plazo (2013-2015), el tratamiento AT<sub>c</sub> redujo el peso de fruto en un 8% respecto a AT-CT, condicionado por la mayor carga en este tratamiento. En el periodo a largo plazo (2016-2018), las diferencias tampoco fueron significativas, aunque destaca que AR-CT, redujo un 10% el PF con respecto al tratamiento control. Para todo el periodo de estudio (2013-2018), tampoco se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Las tendencias encontradas fueron que el tratamiento de AR<sub>c</sub> aumentó un 2% el tamaño del fruto respecto a AT-CT, mientras que AR-CT y AR<sub>c</sub> lo redujeron un 5% y un 6%, respectivamente.

A lo largo de todo el ensayo experimental (2013-2018), la productividad del agua (PA) se comportó de forma similar a la cosecha. La alternancia de fuentes de agua supuso para los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> un aumento significativo del 18% y 20% respectivamente, respecto al tratamiento AT-CT, mientras que el tratamiento AR-CT redujo la PA significativamente un 16% respecto al tratamiento AT-CT.

**Tabla IV.15** Volumen del dosel (VD; m<sup>3</sup>), cosecha (PT; Kg árbol<sup>-1</sup>), cosecha/dosel (PT/VD; kg m<sup>-3</sup>), carga de frutos (CF; frutos árbol<sup>-1</sup>), peso de fruto (PF; g), y productividad del agua (PA; kg m<sup>-3</sup>) para cada año (de 2013 a 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Los valores son medias  $\pm$  SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).

Año	Tratamiento	VD	PT	PT/VD	CF	PF	PA
2013	AT-CT	20,2 $\pm$ 0,3b	73,7 $\pm$ 4,7b	3,6 $\pm$ 0,3b	698,2 $\pm$ 23,6ab	145,1 $\pm$ 7,2ns	5,6 $\pm$ 0,5b
	AR-CT	16,8 $\pm$ 0,4a	40,3 $\pm$ 4,2a	2,4 $\pm$ 0,3a	304,8 $\pm$ 19,3a	139,2 $\pm$ 7,9	3,0 $\pm$ 0,5a
	AT <sub>c</sub>	19,9 $\pm$ 0,4b	85,2 $\pm$ 3,4b	4,3 $\pm$ 0,2c	948,3 $\pm$ 25,0c	117,1 $\pm$ 5,0	6,1 $\pm$ 0,2b
	AR <sub>c</sub>	17,1 $\pm$ 0,3a	79,9 $\pm$ 13,8b	4,7 $\pm$ 0,2c	532,1 $\pm$ 60,3ab	134,5 $\pm$ 9,4	5,7 $\pm$ 0,7b
2014	AT-CT	13,3 $\pm$ 0,3b	87,8 $\pm$ 10,8ns	6,6 $\pm$ 0,9ns	832,7 $\pm$ 67,3ns	126,6 $\pm$ 9,3ab	6,1 $\pm$ 0,5ns
	AR-CT	11,9 $\pm$ 0,5a	113,2 $\pm$ 16,0	9,5 $\pm$ 1,8	1038,7 $\pm$ 96,4	108,3 $\pm$ 2,5a	7,9 $\pm$ 0,7
	AT <sub>c</sub>	12,6 $\pm$ 0,3ab	86,5 $\pm$ 12,7	6,8 $\pm$ 1,2	791,3 $\pm$ 76,1	128,6 $\pm$ 5,8ab	6,0 $\pm$ 0,6
	AR <sub>c</sub>	14,0 $\pm$ 0,6b	103,2 $\pm$ 7,5	7,3 $\pm$ 0,8	1006,4 $\pm$ 48,0	148,3 $\pm$ 6,6b	7,2 $\pm$ 0,3
2015	AT-CT	17,0 $\pm$ 0,5ns	62,7 $\pm$ 6,5a	3,7 $\pm$ 0,5ns	480,1 $\pm$ 32,5ab	116,8 $\pm$ 4,0a	4,7 $\pm$ 0,3a
	AR-CT	15,8 $\pm$ 0,8	54,6 $\pm$ 6,1a	3,4 $\pm$ 0,5	378,4 $\pm$ 27,8a	140,2 $\pm$ 4,7b	4,1 $\pm$ 0,3a
	AT <sub>c</sub>	17,6 $\pm$ 0,7	79,2 $\pm$ 7,5b	4,5 $\pm$ 0,6	600,4 $\pm$ 37,1c	110,5 $\pm$ 3,0a	6,0 $\pm$ 0,4b
	AR <sub>c</sub>	17,6 $\pm$ 1,0	63,6 $\pm$ 3,6a	3,6 $\pm$ 0,4	551,0 $\pm$ 20,5bc	115,8 $\pm$ 4,0a	4,8 $\pm$ 0,2ab
2013-2015	AT-CT	<b>16,8<math>\pm</math>0,4ns</b>	<b>74,7<math>\pm</math>7,3ns</b>	<b>4,4<math>\pm</math>0,5ns</b>	<b>646,7<math>\pm</math>42,9ns</b>	<b>129,5<math>\pm</math>4,41ns</b>	<b>5,4<math>\pm</math>0,3ns</b>
	AR-CT	<b>14,8<math>\pm</math>0,6</b>	<b>69,4<math>\pm</math>8,8</b>	<b>4,7<math>\pm</math>0,8</b>	<b>575,5<math>\pm</math>77,7</b>	<b>129,2<math>\pm</math>3,8</b>	<b>4,9<math>\pm</math>0,5</b>
	AT <sub>c</sub>	<b>16,7<math>\pm</math>0,5</b>	<b>83,6<math>\pm</math>7,9</b>	<b>5,0<math>\pm</math>0,6</b>	<b>780,0<math>\pm</math>74,4</b>	<b>118,7<math>\pm</math>2,9</b>	<b>6,1<math>\pm</math>0,2</b>
	AR <sub>c</sub>	<b>16,2<math>\pm</math>0,6</b>	<b>82,2<math>\pm</math>8,3</b>	<b>5,0<math>\pm</math>0,7</b>	<b>696,5<math>\pm</math>52,3</b>	<b>132,9<math>\pm</math>4,4</b>	<b>5,9<math>\pm</math>0,3</b>
2016	AT-CT	19,7 $\pm$ 0,7ns	93,4 $\pm$ 10,2b	4,7 $\pm$ 0,7b	900,6 $\pm$ 64,5b	116,4 $\pm$ 2,6ab	7,5 $\pm$ 0,5b
	AR-CT	19,0 $\pm$ 0,9	63,2 $\pm$ 3,6a	3,3 $\pm$ 0,3a	640,7 $\pm$ 23,8a	103,8 $\pm$ 3,8a	5,1 $\pm$ 0,2a
	AT <sub>c</sub>	19,1 $\pm$ 0,7	125,6 $\pm$ 10,9c	6,6 $\pm$ 0,8c	1202,4 $\pm$ 68,5c	132,4 $\pm$ 4,9b	10,1 $\pm$ 0,6c
	AR <sub>c</sub>	21,9 $\pm$ 1,1	96,2 $\pm$ 6,0b	4,4 $\pm$ 0,5b	1477,3 $\pm$ 59,9d	123,2 $\pm$ 5,4b	7,7 $\pm$ 0,3b
2017	AT-CT	18,8 $\pm$ 0,3b	90,4 $\pm$ 7,2b	4,8 $\pm$ 0,5ns	627,1 $\pm$ 42,1b	123,1 $\pm$ 10,1ns	7,8 $\pm$ 0,4b
	AR-CT	17,4 $\pm$ 0,4a	71,7 $\pm$ 5,5a	4,1 $\pm$ 0,5	485,3 $\pm$ 31,6a	114,1 $\pm$ 7,0	6,2 $\pm$ 0,3a
	AT <sub>c</sub>	19,3 $\pm$ 0,4b	86,3 $\pm$ 0,7ab	4,5 $\pm$ 0,1	642,8 $\pm$ 4,1b	122,7 $\pm$ 7,1	7,4 $\pm$ 0,0ab
	AR <sub>c</sub>	20,5 $\pm$ 0,3c	111,9 $\pm$ 6,5c	5,4 $\pm$ 0,6	764,4 $\pm$ 37,6c	108,0 $\pm$ 8,6	9,6 $\pm$ 0,4c
2018	AT-CT	20,2 $\pm$ 0,5ab	68,5 $\pm$ 7,2a	3,4 $\pm$ 0,4a	722,5 $\pm$ 21,5b	93,5 $\pm$ 4,2b	5,2 $\pm$ 0,3a
	AR-CT	17,9 $\pm$ 0,6a	58,2 $\pm$ 7,8a	3,2 $\pm$ 0,5a	396,3 $\pm$ 15,1a	80,7 $\pm$ 1,5ab	4,4 $\pm$ 0,3a
	AT <sub>c</sub>	20,6 $\pm$ 0,7ab	98,7 $\pm$ 7,2b	4,8 $\pm$ 0,5b	774,3 $\pm$ 16,0b	77,3 $\pm$ 1,9a	7,5 $\pm$ 0,3b
	AR <sub>c</sub>	22,9 $\pm$ 1,3b	118,6 $\pm$ 6,7c	5,2 $\pm$ 0,6b	1441,2 $\pm$ 23,1c	109,1 $\pm$ 6,0c	8,9 $\pm$ 0,3c
2016-2018	AT-CT	<b>19,5<math>\pm</math>0,3a</b>	<b>84,1<math>\pm</math>8,2b</b>	<b>4,3<math>\pm</math>0,5ns</b>	<b>694,2<math>\pm</math>87,3b</b>	<b>111,0<math>\pm</math>4,1ns</b>	<b>6,7<math>\pm</math>0,3b</b>
	AR-CT	<b>18,1<math>\pm</math>0,4a</b>	<b>64,4<math>\pm</math>5,6a</b>	<b>3,5<math>\pm</math>0,4</b>	<b>513,3<math>\pm</math>61,0a</b>	<b>99,5<math>\pm</math>3,4</b>	<b>5,1<math>\pm</math>0,2a</b>
	AT <sub>c</sub>	<b>19,7<math>\pm</math>0,4a</b>	<b>103,5<math>\pm</math>6,3c</b>	<b>5,2<math>\pm</math>0,4</b>	<b>842,0<math>\pm</math>107,2b</b>	<b>110,8<math>\pm</math>4,6</b>	<b>8,4<math>\pm</math>0,4c</b>
	AR <sub>c</sub>	<b>21,8<math>\pm</math>0,7b</b>	<b>108,9<math>\pm</math>6,4c</b>	<b>5,0<math>\pm</math>0,5</b>	<b>1022,6<math>\pm</math>130,1c</b>	<b>113,4<math>\pm</math>4,0</b>	<b>8,7<math>\pm</math>0,2c</b>
2013-2018	AT-CT	<b>18,2<math>\pm</math>0,5b</b>	<b>79,4<math>\pm</math>7,8a</b>	<b>4,5<math>\pm</math>0,6ns</b>	<b>710,2<math>\pm</math>41,9b</b>	<b>120,2<math>\pm</math>1,2ns</b>	<b>6,1<math>\pm</math>0,4b</b>
	AR-CT	<b>16,5<math>\pm</math>0,5a</b>	<b>66,9<math>\pm</math>7,2a</b>	<b>4,3<math>\pm</math>0,8</b>	<b>540,7<math>\pm</math>35,7a</b>	<b>114,4<math>\pm</math>4,6</b>	<b>5,1<math>\pm</math>0,4a</b>
	AT <sub>c</sub>	<b>18,2<math>\pm</math>0,5b</b>	<b>93,6<math>\pm</math>7,0b</b>	<b>5,2<math>\pm</math>0,6</b>	<b>826,6<math>\pm</math>37,8b</b>	<b>114,8<math>\pm</math>3,6</b>	<b>7,2<math>\pm</math>0,3c</b>
	AR <sub>c</sub>	<b>19,0<math>\pm</math>0,9b</b>	<b>95,6<math>\pm</math>7,3b</b>	<b>5,1<math>\pm</math>0,6</b>	<b>962,1<math>\pm</math>41,6c</b>	<b>123,1<math>\pm</math>6,7</b>	<b>7,3<math>\pm</math>0,4c</b>



## **Calidad de la cosecha**

Se observaron un mayor número de diferencias significativas entre tratamientos para los diferentes parámetros de calidad de fruto en los valores medios para el periodo a largo-plazo (2016-2018) que para el periodo a corto-plazo (2013-2015). Para todo el ciclo (2013-2018), se encontraron diferencias significativas en EC y CSS (Tabla IV.16).

A medio-plazo (2013-2015) se observaron diferencias significativas entre los tratamientos para los diferentes parámetros de calidad de fruto. El tratamiento AR<sub>c</sub> presentó los valores medios más elevados de EC (3.2 mm), siendo en este caso, el tratamiento de AR-CT el de valores significativamente más bajos (2.7 mm), dando como consecuencia un fruto con un Z ligeramente mayor (51,6 mL). El tratamiento AR<sub>c</sub> fue el que presentó los valores bajos de Z (47,2 mL). Se observó un patrón para todos los tratamientos, aumentando del contenido en zumo a medida que disminuye el espesor de corteza. Con respecto al CSS, no se apreciaron diferencias significativas en el valor medio de los tratamientos, aunque el tratamiento que presentó el valor más elevado fue AR-CT, que a su vez, también fue el tratamiento con el contenido de acidez significativamente más alto, dando lugar a una reducción del 6% en el IM respecto al tratamiento control. Como ya se ha visto en otros estudios (Reboll et al., 2000; Pedrero et al., 2014), los tratamientos regados con AR pueden presentar valores más bajos de IM comparados con los tratamientos regados con AT.

Para el periodo a largo plazo (2016-2018), el tratamiento AR-CT presentó los valores de diámetro de fruto (D) y EC significativamente más bajos respecto al tratamiento AT-CT, un 6% y un 21% respectivamente. El riego prolongado con AR, al igual que se ha podido observar en otros estudios (Nicolás et al., 2016; Romero-Trigueros et al., 2017b), produce un fruto de menor tamaño y menor espesor de corteza comparados con los de los tratamientos regados con AT. Con respecto al CSS, AR-CT fue el tratamiento con los valores significativamente más elevados (12,6 °Brix), respecto al control, aunque no afectó al IM, al igual que se ha podido ver en mandarina para otros estudios como (Romero-Trigueros et al., 2017; Romero-Trigueros et al., 2019). Así, el tratamiento que presentó los valores más bajos de IM fue AR<sub>c</sub> (12,8).

Para todo el periodo de estudio (2013-2018), apenas se vieron diferencias significativas entre tratamientos para los distintos parámetros de calidad de fruto.

El tratamiento AR-CT, presentó los valores significativamente más bajos de EC, mientras que el resto de tratamientos aumentaron los valores de CSS respecto a AT-CT.



**Tabla IV.16** Parámetros de calidad de fruto: Diámetro (cm), Espesor de corteza (EC, mm), Contenido de zumo (Z, %), Contenido sólidos solubles (CSS, °Brix), Acidez titulable ( $A_T$ , %) e índice de madurez (IM, CSS/ $A_T$  ratio) para cada año (desde 2013 hasta 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media  $\pm$  SE de la medida de 100 frutos por tratamiento. (25 por repetición). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).

Año	Tratamiento	D	EC	Z	CSS	$A_T$	IM
2013	AT-CT	68,7 $\pm$ 1,3b	3,2 $\pm$ 0,2ns	46,3 $\pm$ 1,7ns	11,8 $\pm$ 0,2ns	0,8 $\pm$ 0,02a	14,5 $\pm$ 0,4b
	AR-CT	66,9 $\pm$ 1,6ab	2,9 $\pm$ 0,2	54,0 $\pm$ 4,1	12,0 $\pm$ 0,4	1,0 $\pm$ 0,04b	12,1 $\pm$ 0,7a
	AT <sub>c</sub>	62,5 $\pm$ 1,3a	2,8 $\pm$ 0,2	52,8 $\pm$ 1,4	12,4 $\pm$ 0,6	0,8 $\pm$ 0,04a	15,2 $\pm$ 0,3b
	AR <sub>c</sub>	66,0 $\pm$ 1,7ab	2,4 $\pm$ 0,1	48,1 $\pm$ 2,2	11,5 $\pm$ 0,3	0,8 $\pm$ 0,02a	14,6 $\pm$ 0,3b
2014	AT-CT	65,1 $\pm$ 2,0ab	3,1 $\pm$ 0,1b	49,8 $\pm$ 1,9ns	11,8 $\pm$ 0,3ns	0,8 $\pm$ 0,03ns	14,3 $\pm$ 0,6ns
	AR-CT	61,5 $\pm$ 0,8a	2,4 $\pm$ 0,1a	53,2 $\pm$ 1,3	11,6 $\pm$ 0,4	0,8 $\pm$ 0,02	14,6 $\pm$ 0,6
	AT <sub>c</sub>	66,0 $\pm$ 1,1ab	2,9 $\pm$ 0,1ab	48,8 $\pm$ 1,5	11,8 $\pm$ 0,3	0,8 $\pm$ 0,03	14,4 $\pm$ 0,3
	AR <sub>c</sub>	68,6 $\pm$ 1,2b	3,7 $\pm$ 0,2c	47,3 $\pm$ 2,2	10,9 $\pm$ 0,2	0,7 $\pm$ 0,02	14,5 $\pm$ 0,3
2015	AT-CT	64,1 $\pm$ 0,8a	2,8 $\pm$ 0,1ns	50,6 $\pm$ 1,4ns	9,8 $\pm$ 0,3a	0,7 $\pm$ 0,02a	14,1 $\pm$ 0,5ab
	AR-CT	69,0 $\pm$ 0,9b	2,8 $\pm$ 0,1	47,6 $\pm$ 1,3	11,2 $\pm$ 0,1b	0,8 $\pm$ 0,03ab	14,2 $\pm$ 0,6ab
	AT <sub>c</sub>	63,4 $\pm$ 0,8a	3,1 $\pm$ 0,2	46,7 $\pm$ 1,2	10,6 $\pm$ 0,4ab	0,9 $\pm$ 0,05b	12,5 $\pm$ 0,8a
	AR <sub>c</sub>	64,4 $\pm$ 0,6a	3,1 $\pm$ 0,1	46,2 $\pm$ 2,1	11,3 $\pm$ 0,2b	0,7 $\pm$ 0,02a	15,2 $\pm$ 0,2b
2013-2015	AT-CT	<b>66,0<math>\pm</math>0,9ns</b>	<b>3,0<math>\pm</math>0,1ab</b>	<b>48,9<math>\pm</math>1,0ns</b>	<b>11,1<math>\pm</math>0,2ns</b>	<b>0,8<math>\pm</math>0,02a</b>	<b>14,7<math>\pm</math>0,3ns</b>
	AR-CT	<b>65,8<math>\pm</math>0,8</b>	<b>2,7<math>\pm</math>0,1a</b>	<b>51,6<math>\pm</math>1,5</b>	<b>11,7<math>\pm</math>0,2</b>	<b>0,9<math>\pm</math>0,02b</b>	<b>13,8<math>\pm</math>0,3</b>
	AT <sub>c</sub>	<b>64,0<math>\pm</math>0,6</b>	<b>2,9<math>\pm</math>0,1ab</b>	<b>49,4<math>\pm</math>0,9</b>	<b>11,6<math>\pm</math>0,2</b>	<b>0,8<math>\pm</math>0,02a</b>	<b>14,1<math>\pm</math>0,4</b>
	AR <sub>c</sub>	<b>66,4<math>\pm</math>0,7</b>	<b>3,2<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>47,2<math>\pm</math>1,2</b>	<b>11,4<math>\pm</math>0,1</b>	<b>0,8<math>\pm</math>0,01a</b>	<b>14,7<math>\pm</math>0,2</b>
2016	AT-CT	65,6 $\pm$ 0,4ab	2,6 $\pm$ 0,1ns	42,1 $\pm$ 1,5ab	11,9 $\pm$ 0,3a	0,9 $\pm$ 0,2ab	13,6 $\pm$ 0,4ns
	AR-CT	63,6 $\pm$ 1,0a	2,8 $\pm$ 0,1	40,6 $\pm$ 1,1a	13,6 $\pm$ 0,1b	0,9 $\pm$ 0,1bc	14,5 $\pm$ 0,2
	AT <sub>c</sub>	68,8 $\pm$ 1,0b	2,8 $\pm$ 0,1	47,1 $\pm$ 1,6bc	12,2 $\pm$ 0,1a	1,0 $\pm$ 0,2c	14,3 $\pm$ 0,2
	AR <sub>c</sub>	67,7 $\pm$ 1,2b	2,9 $\pm$ 0,2	51,3 $\pm$ 1,8c	13,4 $\pm$ 0,1b	0,9 $\pm$ 0,2a	13,5 $\pm$ 0,3
2017	AT-CT	64,31 $\pm$ 1,9ns	2,7 $\pm$ 0,2ns	47,6 $\pm$ 1,6ns	12,1 $\pm$ 0,8a	1,0 $\pm$ 0,01c	12,0 $\pm$ 0,2a
	AR-CT	58,6 $\pm$ 4,0	2,2 $\pm$ 0,1	50,7 $\pm$ 1,9	12,7 $\pm$ 0,2ab	0,9 $\pm$ 0,02ab	13,6 $\pm$ 0,2b
	AT <sub>c</sub>	65,6 $\pm$ 1,4	2,8 $\pm$ 0,2	51,3 $\pm$ 1,3	13,2 $\pm$ 0,2b	1,0 $\pm$ 0,02bc	13,5 $\pm$ 0,3b
	AR <sub>c</sub>	61,9 $\pm$ 1,9	2,2 $\pm$ 0,2	49,2 $\pm$ 1,5	12,0 $\pm$ 0,2a	0,9 $\pm$ 0,02a	13,6 $\pm$ 0,2b
2018	AT-CT	60,0 $\pm$ 1,1b	3,0 $\pm$ 0,1c	46,6 $\pm$ 1,7ns	11,5 $\pm$ 0,1a	1,4 $\pm$ 0,03c	11,6 $\pm$ 0,4ns
	AR-CT	56,5 $\pm$ 0,5a	1,6 $\pm$ 0,1a	47,6 $\pm$ 1,5	11,6 $\pm$ 0,1a	1,0 $\pm$ 0,02ab	11,8 $\pm$ 0,2
	AT <sub>c</sub>	55,0 $\pm$ 0,6a	2,5 $\pm$ 0,1b	46,5 $\pm$ 1,1	11,3 $\pm$ 0,1a	1,0 $\pm$ 0,01a	11,7 $\pm$ 0,1
	AR <sub>c</sub>	63,8 $\pm$ 1,2c	2,9 $\pm$ 0,2bc	42,4 $\pm$ 1,7	12,0 $\pm$ 0,1b	1,1 $\pm$ 0,01b	11,3 $\pm$ 0,1
2016-2018	AT-CT	<b>63,3<math>\pm</math>0,8ab</b>	<b>2,8<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>45,5<math>\pm</math>1,0ns</b>	<b>11,8<math>\pm</math>0,1a</b>	<b>0,9<math>\pm</math>0,03ns</b>	<b>13,1<math>\pm</math>0,2ns</b>
	AR-CT	<b>59,6<math>\pm</math>1,4a</b>	<b>2,2<math>\pm</math>0,1a</b>	<b>46,3<math>\pm</math>1,1</b>	<b>12,6<math>\pm</math>0,1c</b>	<b>0,9<math>\pm</math>0,01</b>	<b>13,3<math>\pm</math>0,2</b>
	AT <sub>c</sub>	<b>63,1<math>\pm</math>1,1ab</b>	<b>2,7<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>48,3<math>\pm</math>0,8</b>	<b>12,2<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>1,0<math>\pm</math>0,01</b>	<b>13,2<math>\pm</math>0,2</b>
	AR <sub>c</sub>	<b>64,5<math>\pm</math>0,9b</b>	<b>2,7<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>47,7<math>\pm</math>1,1</b>	<b>12,5<math>\pm</math>0,1c</b>	<b>0,9<math>\pm</math>0,01</b>	<b>12,8<math>\pm</math>0,2</b>
2013-2018	AT-CT	64,6 $\pm$ 1,0ns	2,9 $\pm$ 0,1b	47,2 $\pm$ 1,1ns	11,5 $\pm$ 0,2a	0,9 $\pm$ 0,1ns	13,4 $\pm$ 0,2ns
	AR-CT	62,7 $\pm$ 1,3	2,5 $\pm$ 0,1a	49,1 $\pm$ 1,2	12,1 $\pm$ 0,1b	0,9 $\pm$ 0,1	13,5 $\pm$ 0,1
	AT <sub>c</sub>	63,6 $\pm$ 1,4	2,8 $\pm$ 0,1b	48,9 $\pm$ 0,9	11,9 $\pm$ 0,1b	0,9 $\pm$ 0,1	13,6 $\pm$ 0,2
	AR <sub>c</sub>	65,4 $\pm$ 1,0	2,9 $\pm$ 0,1b	47,4 $\pm$ 1,2	11,9 $\pm$ 0,1b	0,9 $\pm$ 0,1	13,8 $\pm$ 0,2

## Conclusiones

En regiones áridas y semiáridas como el sureste español, y en especial la Región de Murcia, la falta de agua y el incremento de superficies de cultivo, son problemas graves para la sostenibilidad de la agricultura. Es por ello que el AR puede convertirse en un futuro en una de las principales fuentes de agua o recursos hídricos en estas regiones. En este sentido, es muy importante el estudio del riego con este tipo de aguas en cultivos predominantes, en nuestro caso los cítricos y más concretamente, el mandarino.

A lo largo del ensayo se han estudiado los efectos a medio y largo plazo, no sólo de la utilización de una fuente de agua salina como AR, sino la aplicación de estrategias de riego como la alternancia de fuentes de agua, AT y AR, para ver los resultados tanto en la calidad química del suelo, la fisiología de la planta, y la producción y calidad de la cosecha.

Se observaron aspectos positivos en la aplicación a largo plazo de este tipo de estrategias en el cultivo del mandarino: i) La alternancia de fuentes de agua no produjo una acumulación de sales en el suelo, reduciendo los valores medios de  $CE_s$ ,  $RAS_s$  y  $CROSS_s$  en  $AT_c$  y  $AR_c$  respecto a  $AR-CT$ . ii) El tratamiento  $AR_c$ , aumentó los valores de  $A$  y  $g_s$  respecto a  $AT-CT$ . iii)  $AT_c$  y  $AR_c$  experimentaron un incremento del volumen del dosel vegetal, dando lugar a un aumento de la cosecha y, por lo tanto, una mayor carga de frutos en el árbol sin verse afectado el peso de los mismos, especialmente en  $AR_c$  ii) La aplicación de  $AT_c$  y  $AR_c$  dio lugar a una mayor productividad del agua de riego a largo plazo. iii) La calidad del fruto se vio afectada de manera positiva, con un ligero aumento del contenido en zumo y azúcares en comparación con el tratamiento  $AT-CT$ . iv) La alternancia de aguas, no produjo una acumulación de elementos fitotóxicos en hoja, incrementando en septiembre el intercambio gaseoso ( $A$  y  $g_s$ ).

Sin embargo, cuando se aplicó únicamente agua salina AR, se encontraron aspectos negativos en este tipo de aguas: i) El riego prolongado con AR aumentó considerablemente los valores de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ , influyendo directamente en la calidad del suelo (estructura del suelo). ii) Disminuyó el tamaño del dosel vegetal, la carga del fruto y la producción, afectando a la productividad del agua de riego. iii) La aplicación prolongada de agua salina influyó negativamente en los frutos, con un menor peso de los mismos en comparación con el tratamiento  $AT-CT$ . iv) El uso prolongado de AR, produjo una acumulación de elementos fitotóxicos en



hoja, influyendo en la fisiología de la planta y disminuyendo el intercambio gaseoso ( $A$  y  $g_s$ ).

Aunque la aplicación prolongada de AR afectó negativamente, sin embargo, el menor tamaño de frutos obtenidos con el riego con AR, provocó un mayor CSS y un menor EC.

En este estudio, se muestra la viabilidad a largo plazo del uso de AR salina junto con estrategias de riego como es la alternancia de fuentes de agua de distinta calidad,  $AT_c$  y  $AR_c$ , en términos de cosecha, calidad de fruta, calidad del suelo y agrofisiología del cultivo, en un cítrico de gran interés como el mandarino. No obstante, el uso de AR debe de hacerse con cautela y supervisión, ya que una mala “praxis” de la misma daría lugar a una degradación de los suelos, contaminación de acuíferos y daños fitotóxicos a nivel del cultivo.

Dado que el AR será en los próximos años un recurso hídrico de gran relevancia y, observando cada vez menos diferencia entre las estaciones, predominando las de mayor demanda evapotranspirativa, debe evaluarse su viabilidad más allá de este periodo de estudio, ya que es fundamental para la sostenibilidad de la agricultura en estas zonas, y un ahorro de recursos hídricos considerados de buena calidad agronómica como es el AT.

## ***APARTADO 5. “Efectos del agua regenerada salina y la alternancia de fuentes de agua en la cosecha y calidad de fruto en el cultivo del pomelo a medio-largo plazo”.***

### **Resumen**

El objetivo de este capítulo es estudiar la viabilidad del uso de AR salina, caracterizada por una alta concentración de sales en cítricos a medio-largo plazo, concretamente en pomelo, injertado sobre patrón macrofila (*Citrus Macrophylla*), caracterizado por su resistencia a la salinidad (Pedrero et al., 2015). A su vez, se pretenden introducir nuevas estrategias de riego, como la alternancia de aguas de distinta calidad agronómica, en un cultivo en auge como es el pomelo, con el objetivo de evaluar la rentabilidad y sostenibilidad del riego con un RHNC como el AR durante el periodo de mayor demanda, como es el estival.

Para ello, se dispuso de una fuente de agua considerada de buena calidad agronómica como es el agua procedente del trasvase Tajo-Segura (AT), con una conductividad eléctrica (CE) en torno a 1 dS/m y agua procedente de la EDAR Molina Norte (AR) con una CE  $\approx$  3-3,5 dS/m. Se ha llevado a cabo un seguimiento de los parámetros de calidad de agua (CE<sub>a</sub> y RAS<sub>a</sub>), parámetros del suelo que puedan afectar directamente al desarrollo fisiológico de la planta (CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>), parámetros de intercambio gaseoso (A, g<sub>s</sub>), elementos fitotóxicos a nivel foliar, así como parámetros de producción y calidad de cosecha.

El uso de AR afecta tanto a nivel fisiológico, como a la producción y calidad de la cosecha (Pérez-Pérez et al., 2015; Nicolás et al 2016; Nicolás et al., 2017; Indira Paudel et al., 2018). En este trabajo se pretenden demostrar los posibles beneficios derivados del uso prolongado de AR, combinado con estrategias como la alternancia de fuentes de agua, sin aplicar restricciones hídricas durante el ciclo de cultivo. De este modo, la aplicación de este tipo de estrategias, junto con el uso de AR, no debería influir negativamente en la fisiología de la planta, producción y la calidad de cosecha.



## Introducción y objetivos

En este capítulo se estudia por primera vez, el uso prolongado de AR salina en pomelo, junto con la aplicación de estrategias de alternancia de agua, coincidiendo con el período estival, de mayor demanda evapotranspirativa, sin aplicar restricciones hídricas. En concreto, en el ensayo, se alternaron dos fuentes de agua, AT y AR, en la fase II de crecimiento del fruto, donde las necesidades hídricas del cultivo son mayores. Con ello, se pretenden reducir las aportaciones de AT en verano, dada su elevada demanda y difícil disponibilidad, consiguiendo un ahorro considerable de la misma.

El objetivo de este estudio fue evaluar a medio-largo plazo en pomelo, los efectos de este tipo de estrategias en la fisiología y las características químicas del suelo y de la planta, así como, sobre la producción y calidad de la cosecha. Dada la relevancia de los datos obtenidos, el ciclo de cultivo se dividió en dos subperiodos, un periodo a medio plazo (2013-2015), y un periodo a largo plazo (2016-2018). Este tipo de estudios es novedoso, ya que actualmente no existen referencias o citas bibliográficas con los que podamos comparar o referenciar este estudio en las mismas condiciones o características.

## Materiales y métodos.

### Tratamientos de riego y calidad del agua de riego

El ensayo se llevó a cabo en una finca comercial de cítricos, situado en el noreste de la región de Murcia, en Campotéjar. Se dispuso de una parcela experimental de 0,5 ha de pomelo (*Citrus Paradisi Macf*), de variedad “Star Ruby” plantados en el año 2005 e injertados sobre patrón macrofila (*Citrus Macrophylla*) (Capítulo III). La parcela se regó con dos fuentes de agua de calidad agronómica distinta (AT y AR) y el riego se programó en función de la evapotranspiración diaria del cultivo ( $ET_c$ ), siendo los tratamientos establecidos: **AT-CT**, **AT-CT**, **AT**, y **AR**. La calidad del agua de riego se determinó mediante análisis físico-

químico. Para ello se llevó a cabo un seguimiento de los parámetros de conductividad eléctrica ( $CE_a$ ) y sólidos disueltos totales (SDT), pH, y turbidez. También se realizó un seguimiento de la concentración de cationes y aniones en ambas fuentes de agua (Capítulo III).

### **Medidas de suelo y de la planta**

Se tomaron muestras de suelo en todos los tratamientos estudiados, antes y después de realizar la alternancia de fuentes de agua de riego (Capítulo III). Las muestras se cogieron a 30 cm de distancia del emisor y a 30 cm de profundidad, coincidiendo con la zona de mayor concentración de raíces. La  $CE_s$  se determinó mediante la preparación de la pasta saturada, midiendo en el extracto de la misma. A su vez, se determinaron los valores de  $RAS_s$  y  $CROSS_s$ , fundamentales en este tipo de estudios donde se usan fuentes de agua salina como AR.

Las medidas de intercambio gaseoso y muestreo de hoja se realizaron durante los meses de junio y septiembre, coincidiendo con la fase II de acumulación de azúcares en el fruto y aumento de la tasa fotosintética de la planta. Los parámetros de intercambio gaseoso foliar (fotosíntesis neta  $[A]$  y conductancia estomática  $[g_s]$ ) se determinaron en días claros y en hojas adultas, completamente expandidas y del segmento medio de cada árbol.

Los parámetros  $A$  y  $g_s$  se determinaron con un equipo de fotosíntesis portátil equipado con una cámara de fluorescencia foliar con cubeta de 2 cm<sup>2</sup> y un inyector de CO<sub>2</sub> (Capítulo III). Las medidas fueron realizadas a una concentración de CO<sub>2</sub> de 400 ppm (similar a la concentración de CO<sub>2</sub> ambiental), una intensidad de luz saturante de 1200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y a temperatura y HR ambiental. El flujo de aire se ajustó a 300 ml·min<sup>-1</sup>. Las mediciones se realizaron en hojas expuestas a la luz solar entre las 8:00-10:00 GMT, dependiendo de la estación del año, dado que en dicho intervalo es cuando la  $g_s$  alcanza los valores más elevados y, además, se evitan temperaturas altas y baja HR, por lo tanto, existe un menor déficit de presión de vapor (DPV).



## **Cosecha y calidad de fruto**

En cada ciclo vegetativo, se determinó en cada uno de los tratamientos (i) el número de frutos por árbol, (ii) el rendimiento, en kilogramos totales por árbol, (iii) el peso de los frutos y (iv) la distribución de los frutos en diámetros comerciales. La calidad de la fruta se evaluó anualmente mediante la recolección aleatoria de 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Los parámetros evaluados fueron: el espesor de corteza (EC), el contenido de zumo (CZ), el contenido de sólidos solubles (CSS), la acidez titulable ( $A_T$ ) y el índice de madurez (IM).

## **Diseño experimental y análisis estadístico.**

El diseño experimental para cada tratamiento de riego incluyó 4 parcelas experimentales estándar distribuidas siguiendo un diseño completamente aleatorio. Cada réplica estaba compuesta por 12 árboles, organizados en 3 filas adyacentes. Se utilizaron un total de 192 pomelos. Todas las mediciones se realizaron en los dos árboles centrales de la fila central de cada réplica (2 árboles por bloque, 8 por tratamiento), mientras que los árboles del borde se excluyeron del estudio para eliminar posibles efectos de borde.

Los valores medios de cada muestreo se interpretaron mediante un análisis de varianza (ANOVA). Las regresiones lineales se calcularon usando Excel y para evaluar la significación de estas relaciones se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando SPSS (vers. 29.0 para Windows, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

## Resultados y discusión

### Calidad de agua de riego y volumen aplicado

Se observaron diferencias significativas de calidad química entre el agua procedente del trasvase AT y la procedente de la depuradora AR durante todo el periodo 2013-2018. El AR se caracterizó por tener una mayor salinidad y sodicidad con valores medios de  $CE_a$  en torno a  $3.4 \text{ dSm}^{-1}$  y  $RAS_a$  de  $6.4 \text{ (meqL}^{-1})^{0.5}$ . Para AT se observaron valores más bajos de ambos parámetros,  $CE_a$  de  $1.1 \text{ dSm}^{-1}$  y  $RAS_a$  de  $1.3 \text{ (meqL}^{-1})^{0.5}$  (Tabla IV.17). El AR también presentó mayores valores de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{B}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que el AT.

Así mismo, se destaca que el AR superó los umbrales considerados límite, tanto para Na como para B y Cl, a partir de los cuales se podrían observar efectos perjudiciales para los cítricos:  $\text{Na} > 5.0 \text{ meqL}^{-1}$  (Bernstein et al., 1956),  $\text{Cl} > 6.7 \text{ meqL}^{-1}$  (Ayers y Westcot, 1985) y  $\text{B} > 0.5 \text{ meqL}^{-1}$  (Grieve et., 2012).

**Tabla IV.17** Análisis físico-químico del agua de riego (conductividad eléctrica;  $CE_a$ , relación de absorción de sodio; RAS, pH, cationes,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y aniones,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR) para el periodo 2013-2018. Valores medios  $\pm$  SE para los 6 años, con  $n = 72$  (cada año  $n=12$ ). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).

Parámetro	Unit	AT	AR
$CE_a$	dS m	1.1a	3.4b
RAS	$(\text{meq L}^{-1})^{0.5}$	1.3a	6.4b
pH		8.3a	7.8a
$\text{Ca}^{+2}$	meq L <sup>-1</sup>	4.4a	7.2b
$\text{Mg}^{+}$	meq L <sup>-1</sup>	3.4a	8.0b
$\text{K}^{+}$	mg L <sup>-1</sup>	6.4a	38.5b
$\text{Na}^{+}$	meq L <sup>-1</sup>	3.4a	17.6b
$\text{B}^{+}$	mg L <sup>-1</sup>	0.1a	0.6b
$\text{Cl}^{-}$	meq L <sup>-1</sup>	3.1a	16.8b
$\text{NO}_3^{-}$	mg L <sup>-1</sup>	7.5a	16.7b
$\text{PO}_4^{-}$	mg L <sup>-1</sup>	1.3a	2.4b
$\text{SO}_4^{-}$	meq L <sup>-1</sup>	5.7a	13.9b



Teniendo en cuenta la mayor concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{K}^+$  en AR e independientemente del programa de fertirrigación, el AR podría haber aportado un porcentaje en nutrientes para cubrir las necesidades del cultivo. Así pues, el uso de AR podría reducir significativamente el aporte de fertilizantes y sus costes asociados (Maurer y Davies, 1993; Pedrero et al., 2013).

La media de  $\text{ET}_0$  y precipitaciones para el periodo (2013-2015) fue de 1402 mm y 255 mm respectivamente; 1398 mm y 322 mm para el periodo (2016-2018) respectivamente; y 1400 mm y 288 mm para todo el periodo de estudio (2013-2018). Los tratamientos AT-CT y AR-CT recibieron la misma cantidad de agua, 592  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  en el periodo (2013-2015), 579  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  en el periodo (2016-2018) y 586  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  respectivamente para la media global de todo el ensayo (2013-2018). El tratamiento  $\text{AT}_c$  recibió 409 y 184  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  de AT y AR respectivamente en el periodo (2013-2015); 352 y 227  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  respectivamente en el periodo (2016-2018); y 380 y 205  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  respectivamente en el periodo medio global (2013-2018). El tratamiento  $\text{AR}_c$  recibió 409 y 184  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  de AR y AT respectivamente para el periodo medio plazo; 352 y 227  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  de AR y AT respectivamente en el periodo largo plazo (2016-2018); y 380 y 205  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$  respectivamente para todo el periodo experimental (2013-2018) (Tabla IV.18).

**Tabla IV.18** Temperatura (T, °C), precipitación (P, mm), evapotranspiración de referencia ( $\text{ET}_0$ , mm), volumen de agua aplicada (R,  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) para cada año (de 2013 a 2018) y valores medios para los periodos a medio (2013-2015), a largo plazo (2016-2018) y la media de todo el ensayo experimental (2013-2018).

Año	T	P	$\text{ET}_0$	R	$\text{AT}_c$		$\text{AR}_c$	
					AT	AR	AT	AR
2013	17.4	249	1394	570	422	148	148	422
2014	18.3	258	1431	614	424	190	190	424
2015	18.2	259	1381	593	380	213	213	380
<b>2013-2015</b>	<b>18.0</b>	<b>255</b>	<b>1402</b>	<b>592</b>	<b>409</b>	<b>184</b>	<b>184</b>	<b>409</b>
2016	18.2	449	1373	572	338	234	234	338
2017	18.1	204	1427	595	381	214	214	381
2018	17.8	321	1394	571	338	234	234	338
<b>2016-2018</b>	<b>18.1</b>	<b>322</b>	<b>1398</b>	<b>579</b>	<b>352</b>	<b>227</b>	<b>227</b>	<b>352</b>
<b>2013-2018</b>	<b>18</b>	<b>290</b>	<b>1400</b>	<b>586</b>	<b>380</b>	<b>205</b>	<b>205</b>	<b>380</b>

### Acumulación de sales en el suelo.

El riego con AR se caracteriza por su alto contenido en sales solubles, siendo NaCl, la de mayor presencia (Rengasamy, 2018), pudiendo dañar la estructura del suelo, si se compara con AT (Assouline and Narkis, 2013; Bardhan et al., 2016; Levy and Assouline et al., 2010; Schacht and Marschner, 2015).

En este sentido, en invierno, los valores medios del periodo a medio-plazo (2013-2015) de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub> fueron más bajos en el tratamiento AT-CT que para el resto, siendo significativo para RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, dado su bajo contenido en sales en el suelo (Tabla IV.19). Sin embargo, en este periodo, los valores más elevados no se dan en el tratamiento AR-CT, sino en el de AR<sub>c</sub>, siendo el incremento para RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub> significativo. AR-CT y AR<sub>c</sub> tuvieron el mismo incremento de CE<sub>s</sub>, pero AR<sub>c</sub> presentó valores más altos de RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub> en comparación con AR-CT, debido a una mayor presencia de Ca y Mg.

El perfil de suelo en el tratamiento AR<sub>c</sub> presentó una mejor estructura del mismo, y, por tanto, una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes en comparación con el tratamiento de AR-CT, al haberse aportado menos sales a lo largo del ciclo de cultivo, manteniendo la capacidad para retener sales con capacidad de intercambio catiónico (Xueling Liang et al., 2021).

En verano, al igual que en invierno para el periodo a medio-plazo (2013-2015), AT-CT es el tratamiento que presenta los valores medios significativamente más bajos de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub> en comparación al resto de tratamientos. En este caso, el tratamiento de AT<sub>c</sub> presentó significativamente el valor más alto de CE<sub>s</sub>, coincidiendo con el periodo en el que se riega con AR. En este periodo, el tratamiento AR-CT tiene los valores más elevados de RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>. Estos datos dan a entender que, como se ha citado anteriormente, el suelo presenta mayor capacidad de retención e intercambio catiónico en el AT<sub>c</sub> comparado con el de AR-CT. En el tratamiento AR-CT, se produce una mayor degradación de la estructura del suelo en comparación con el de AT<sub>c</sub>, debido a una mayor concentración de Na y K (Hirzel et al., 2017; Rengasamy, 2018), perdiendo su capacidad de retención y disminuyendo la presencia de Mg y Ca (Alma-Delia,



2016). Por lo tanto, la capacidad de intercambio catiónico y aireación del suelo disminuye en el tratamiento AR, dando como consecuencia, valores más altos de RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub> con respecto a los niveles registrados en el tratamiento AT<sub>c</sub>.

Para los valores medios del periodo 2016-2018, las tendencias son muy similares a las vistas para el medio-plazo, tanto en el período invernal como estival. Los valores de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, aumentaron considerablemente independientemente del tratamiento, cuando se riegan con AR, dado su alto contenido en sales (Grattan et al., 2015; Bastida et al., 2017; Zolti et al., 2019). En invierno, destaca el tratamiento AR<sub>c</sub>, con un incremento de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, de 42%, 29% y 25% respecto al tratamiento control AT-CT, por su alto contenido en sales. En verano se observaron valores significativamente más altos de CE<sub>s</sub> y RAS<sub>s</sub> para los tratamientos AR-CT y AT<sub>c</sub>, incrementándose un 69% y 52% en AR-CT y 82% y 35% en AT<sub>c</sub> respectivamente, mientras que los valores medios significativamente más altos de CROSS<sub>s</sub> se vieron en AR-CT, con un incremento del 60% respecto a AT-CT.

Para todo el periodo de estudio (2013-2018), la tendencia es muy similar a la observada para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Los valores significativamente más bajos de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, se vieron en ambas estaciones para el tratamiento AT-CT, mientras que los valores más elevados de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, se observaron en los tratamientos regados con el AR, destacando en invierno AR-CT y AR<sub>c</sub>, y en verano, AR-CT y AT<sub>c</sub>. En invierno dada la baja demanda evaporativa y una menor degradación del suelo, AR<sub>c</sub> es el tratamiento que más sales acumula en el perfil del suelo, dando como consecuencia unos valores de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub> mayores al resto de tratamientos, multiplicando por tres los valores medios respecto a AT-CT. En verano, con el aumento de la tasa evaporativa y la menor disponibilidad del agua debido a la alta concentración de sales en la solución del suelo, hacen que AR-CT y AT<sub>c</sub> sean los tratamientos que presenten los valores significativamente más altos de CE<sub>s</sub>, RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, produciéndose un incremento de 69%, 42% y 41% para AR-CT y 91% 30% y 36% para AT<sub>c</sub> respecto al tratamiento control AT-CT.

**Tabla IV.19** Conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada del suelo ( $CE_s$ ,  $dS\ m^{-1}$ ), relación de absorción de sodio ( $RAS_s$ ) y relación de cationes de la estabilidad estructural del suelo ( $CROSS_s$ ) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018) en invierno (febrero) y al final del verano (septiembre). Los valores son medias  $\pm$  SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).

Año	Tratamiento	Invierno [Febrero]			Verano [Septiembre]		
		CE.	RAS.	CROSS.	CE.	RAS.	CROSS.
2013	AT-CT	1,5 $\pm$ 0,2a	2,1 $\pm$ 0,1a	2,7 $\pm$ 0,1a	2,4 $\pm$ 0,1a	5,7 $\pm$ 0,1a	6,7 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,3 $\pm$ 0,1b	4,8 $\pm$ 0,1c	5,9 $\pm$ 0,1c	3,5 $\pm$ 0,1b	7,0 $\pm$ 0,1b	8,4 $\pm$ 0,1b
	ATc	1,9 $\pm$ 0,1a	3,7 $\pm$ 0,1b	4,8 $\pm$ 0,2b	4,4 $\pm$ 0,1c	6,2 $\pm$ 0,1ab	7,6 $\pm$ 0,1ab
	ARc	3,7 $\pm$ 0,1b	7,2 $\pm$ 0,1d	8,6 $\pm$ 0,1d	2,8 $\pm$ 0,1ab	5,4 $\pm$ 0,3a	6,8 $\pm$ 0,3a
2014	AT-CT	1,5 $\pm$ 0,01a	2,0 $\pm$ 0,1a	2,6 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	4,9 $\pm$ 0,1a	5,6 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,4 $\pm$ 0,1b	4,9 $\pm$ 0,1c	6,0 $\pm$ 0,1c	4,2 $\pm$ 0,1b	8,3 $\pm$ 0,7c	9,5 $\pm$ 0,7b
	ATc	1,9 $\pm$ 0,2a	3,5 $\pm$ 0,1b	4,2 $\pm$ 0,1b	4,6 $\pm$ 0,1b	7,8 $\pm$ 0,3c	8,3 $\pm$ 0,3ab
	ARc	3,5 $\pm$ 0,1b	7,1 $\pm$ 0,2d	8,5 $\pm$ 0,3d	2,5 $\pm$ 0,1a	5,8 $\pm$ 0,1b	7,2 $\pm$ 0,2ab
2015	AT-CT	1,7 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	2,8 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	5,2 $\pm$ 0,1ns	5,6 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,4 $\pm$ 0,2b	4,8 $\pm$ 0,3b	6,1 $\pm$ 0,5bc	3,6 $\pm$ 0,2b	7,0 $\pm$ 0,1	8,0 $\pm$ 0,1b
	ATc	1,9 $\pm$ 0,1a	3,7 $\pm$ 0,3ab	4,4 $\pm$ 0,4ab	4,8 $\pm$ 0,1c	6,3 $\pm$ 0,3	7,5 $\pm$ 0,2ab
	ARc	3,5 $\pm$ 0,01b	7,2 $\pm$ 0,1c	8,7 $\pm$ 0,2c	2,6 $\pm$ 0,1a	5,5 $\pm$ 0,3	6,6 $\pm$ 0,4ab
2013-2015	AT-CT	1,5 $\pm$ 0,1a	2,1 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	5,2 $\pm$ 0,1a	5,9 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,4 $\pm$ 0,1b	4,8 $\pm$ 0,1c	6,0 $\pm$ 0,2c	3,8 $\pm$ 0,1c	7,5 $\pm$ 0,3c	8,6 $\pm$ 0,3d
	ATc	1,9 $\pm$ 0,1a	3,6 $\pm$ 0,1b	4,5 $\pm$ 0,2b	4,6 $\pm$ 0,1d	6,7 $\pm$ 0,2b	7,8 $\pm$ 0,2c
	ARc	3,6 $\pm$ 0,1b	7,2 $\pm$ 0,1d	8,6 $\pm$ 0,1d	2,6 $\pm$ 0,1b	5,6 $\pm$ 0,3a	6,9 $\pm$ 0,3b
2016	AT-CT	1,7 $\pm$ 0,1a	2,0 $\pm$ 0,1a	2,5 $\pm$ 0,1a	2,2 $\pm$ 0,1a	5,6 $\pm$ 0,1a	6,3 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,1 $\pm$ 0,1c	4,1 $\pm$ 0,2a	5,3 $\pm$ 0,3b	4,0 $\pm$ 0,1b	8,6 $\pm$ 0,1b	9,9 $\pm$ 0,1c
	ATc	2,2 $\pm$ 0,1b	3,1 $\pm$ 0,1a	3,7 $\pm$ 0,0ab	4,5 $\pm$ 0,1b	7,2 $\pm$ 0,1b	8,7 $\pm$ 0,1b
	ARc	3,5 $\pm$ 0,1c	7,9 $\pm$ 0,4b	9,6 $\pm$ 0,5c	3,0 $\pm$ 0,3ab	5,7 $\pm$ 0,3a	6,6 $\pm$ 0,4a
2017	AT-CT	1,7 $\pm$ 0,1a	2,1 $\pm$ 0,1a	2,7 $\pm$ 0,1a	2,3 $\pm$ 0,2a	4,8 $\pm$ 0,1a	5,3 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,4 $\pm$ 0,2b	3,9 $\pm$ 0,1b	5,3 $\pm$ 0,1c	3,7 $\pm$ 0,1bc	7,7 $\pm$ 0,1c	9,1 $\pm$ 0,1b
	ATc	1,9 $\pm$ 0,1a	3,6 $\pm$ 0,1b	4,1 $\pm$ 0,1b	4,3 $\pm$ 0,1c	7,1 $\pm$ 0,2bc	8,5 $\pm$ 0,2b
	ARc	3,6 $\pm$ 0,1b	7,4 $\pm$ 0,1c	9,2 $\pm$ 0,1d	2,7 $\pm$ 0,1ab	6,5 $\pm$ 0,1b	8,0 $\pm$ 0,1b
2018	AT-CT	1,6 $\pm$ 0,1a	1,8 $\pm$ 0,1a	2,5 $\pm$ 0,1a	2,3 $\pm$ 0,1a	5,6 $\pm$ 0,1a	6,4 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,6 $\pm$ 0,1b	4,0 $\pm$ 0,1b	5,3 $\pm$ 0,1b	4,2 $\pm$ 0,3b	8,2 $\pm$ 0,1b	9,8 $\pm$ 0,1b
	ATc	2,0 $\pm$ 0,1a	3,3 $\pm$ 0,1b	4,6 $\pm$ 0,1b	3,8 $\pm$ 0,1b	7,1 $\pm$ 0,2b	8,6 $\pm$ 0,3b
	ARc	3,4 $\pm$ 0,1b	7,9 $\pm$ 0,1c	9,6 $\pm$ 0,1c	2,4 $\pm$ 0,1a	6,3 $\pm$ 0,1ab	7,8 $\pm$ 0,1ab
2016-2018	AT-CT	1,6 $\pm$ 0,1a	1,9 $\pm$ 0,1a	2,6 $\pm$ 0,1a	2,3 $\pm$ 0,1a	5,3 $\pm$ 0,1a	6,0 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,4 $\pm$ 0,1c	4,0 $\pm$ 0,1b	5,3 $\pm$ 0,1c	3,9 $\pm$ 0,1b	8,1 $\pm$ 0,1b	9,6 $\pm$ 0,1d
	ATc	2,0 $\pm$ 0,1b	3,3 $\pm$ 0,1b	4,1 $\pm$ 0,1b	4,2 $\pm$ 0,1b	7,2 $\pm$ 0,1b	8,6 $\pm$ 0,2c
	ARc	3,5 $\pm$ 0,1c	7,7 $\pm$ 0,2c	9,5 $\pm$ 0,2d	2,7 $\pm$ 0,1a	6,2 $\pm$ 0,1a	7,5 $\pm$ 0,2b
2013-2018	AT-CT	1,6 $\pm$ 0,1a	2,0 $\pm$ 0,1a	2,6 $\pm$ 0,1a	2,3 $\pm$ 0,1a	5,2 $\pm$ 0,1a	6,0 $\pm$ 0,1a
	AR-CT	3,4 $\pm$ 0,1c	4,4 $\pm$ 0,1c	5,6 $\pm$ 0,1c	3,9 $\pm$ 0,1c	7,4 $\pm$ 0,1c	8,5 $\pm$ 0,2c
	ATc	1,9 $\pm$ 0,1b	3,5 $\pm$ 0,1b	4,3 $\pm$ 0,1b	4,4 $\pm$ 0,1d	6,8 $\pm$ 0,1c	8,2 $\pm$ 0,1c
	ARc	3,5 $\pm$ 0,1c	7,5 $\pm$ 0,1d	9,0 $\pm$ 0,1d	2,7 $\pm$ 0,1b	5,9 $\pm$ 0,1b	7,2 $\pm$ 0,2b



### Fotosíntesis, intercambio gaseoso y productividad del agua.

Se realizaron medidas de intercambio gaseoso foliar (fotosíntesis  $[A]$  y conductancia estomática  $[g_s]$ ) (Tabla IV.20) durante los meses de junio y septiembre, lo que nos permitió calcular la eficiencia del uso del agua (EUA), tanto para los tratamientos regados con AT como los regados con AR.

Para el periodo medio-plazo (2013-2015), en junio, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo AT-CT, el tratamiento con los valores de  $A$  y  $g_s$  más elevados, como se observó en Romero-Trigueros et al. (2014a), mientras que AR-CT presentó valores de EUA más bajos en comparación con el resto de tratamientos, aunque no significativamente. En septiembre, para el mismo periodo, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, a excepción de la EUA, donde el tratamiento AT-CT presentó los valores significativamente más bajos ( $89,5 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), siendo AR-CT el tratamiento con el valor significativamente más elevado ( $104,9 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), debido a que disminuyó en mayor medida  $g_s$  (36%) que  $A$  (21%). Los tratamientos que presentaron valores significativamente más elevados de  $A$  y  $g_s$  fueron AR<sub>c</sub> ( $A$ :  $13,9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $g_s$ :  $0,14 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y AT<sub>c</sub> ( $A$ :  $14,9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $g_s$ :  $0,15 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Dado el carácter anisohídrico del pomelo, los tratamientos de alternancia de agua, son capaces de aumentar su tasa transpirativa en periodos de mayor demanda evaporativa.

Por el contrario, AR-CT presentó los valores significativamente más bajos ( $A$ :  $10,9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $g_s$ :  $0,1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) como consecuencia de una mayor regulación estomática, provocada por el aumento de Na, Cl y B foliar, de acuerdo con numerosos autores como (Lloyd et al., 1987; Anjum et al., 2008; Melgar et al., 2008; Hussain et al., 2012; Romero-Trigueros et al., 2014a; Romero-Trigueros et al., 2017b).

Para el periodo a largo plazo (2016-2018), al igual que para el periodo a medio plazo, los valores más elevados de  $A$  y  $g_s$  en junio se dieron

significativamente en el tratamiento AT ( $A: 7,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $g_s: 0,1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), siendo AR-CT ( $A: 5,5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $g_s: 0,08 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y AT<sub>c</sub>, ( $A: 4,8 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $g_s: 0,06 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) los tratamientos con los valores más bajos. Sin embargo, AT<sub>c</sub> fue el tratamiento que presentó el mayor incremento en la de EUA ( $76,43 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), aunque no significativamente, debido a una mayor reducción de  $g_s$  en comparación con la reducción de A. En septiembre se dio un cambio de tendencia al igual que a medio plazo, ya que el tratamiento con el valor significativamente más alto de A fue AT<sub>c</sub> ( $15,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Este tratamiento presentó los valores más altos de  $g_s$ , aunque no significativamente. Por contra, el tratamiento AR-CT presentó el valor más bajo ( $0,1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), asociado como se verá posteriormente, con una toxicidad de Cl y/o Na (Levy and Syvertsen et al., 2004). Para este periodo, se produce un aumento del 20% y 13% de A en los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> con respecto al control, traduciéndose en un aumento de EUA. En septiembre, al igual que en junio, el tratamiento AT-CT, presentó los valores significativamente más bajos de EUA, respecto al resto de tratamientos.

Para todo ciclo de estudio (2013-2018), en junio, al igual que en los periodos medio y largo-plazo, AT-CT fue el tratamiento con los valores significativamente más altos de A y  $g_s$  ( $A: 8,7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $g_s: 0,1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). El tratamiento AT<sub>c</sub> presentó el valor más elevado de EUA ( $100,2 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), aunque no significativamente. En septiembre, el tratamiento AT<sub>c</sub> presentó significativamente los valores más altos de A y EUA, siendo el tratamiento AT-CT el que presentó los menores niveles de ambos parámetros, aunque mayor de  $g_s$ .



**Tabla IV.20** Parámetros de fotosíntesis [ $A$ ] ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ) ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y eficiencia del uso del agua (EUA) ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018) y periodo completo (2013-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media  $\pm$  SE de ocho árboles, dos árboles por repetición. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).

Año	Parámetro	Junio			Septiembre			
		Tratamiento	A	$g_s$	EUA	A	$g_s$	EUA
2013	AT-CT		7,8 $\pm$ 1,7ns	0,09 $\pm$ 0,1ns	84,2 $\pm$ 11,8ns	12,9 $\pm$ 1,2ns	0,14 $\pm$ 0,1b	92,9 $\pm$ 6,4a
	AR-CT		5,9 $\pm$ 1,0	0,06 $\pm$ 0,1	108,3 $\pm$ 8,6	12,5 $\pm$ 0,9	0,09 $\pm$ 0,1a	148,2 $\pm$ 17,3b
	ATc		6,4 $\pm$ 0,9	0,07 $\pm$ 0,1	98,9 $\pm$ 5,6	13,7 $\pm$ 0,8	0,11 $\pm$ 0,1ab	121,1 $\pm$ 4,7ab
	ARc		7,4 $\pm$ 1,6	0,08 $\pm$ 0,1	95,3 $\pm$ 7,1	10,8 $\pm$ 1,1	0,12 $\pm$ 0,1ab	95,3 $\pm$ 7,3a
2014	AT-CT		13,9 $\pm$ 0,2b	0,19 $\pm$ 0,1b	72,1 $\pm$ 1,9ns	11,3 $\pm$ 0,8ns	0,13 $\pm$ 0,1ns	86,6 $\pm$ 2,9a
	AR-CT		12,3 $\pm$ 0,5a	0,16 $\pm$ 0,1a	77,5 $\pm$ 0,9	11,9 $\pm$ 1,4	0,12 $\pm$ 0,1	101,3 $\pm$ 10,9ab
	ATc		13,3 $\pm$ 0,2ab	0,18 $\pm$ 0,1ab	73,7 $\pm$ 0,8	14,5 $\pm$ 0,4	0,14 $\pm$ 0,1	104,8 $\pm$ 2,1ab
	ARc		13,1 $\pm$ 0,3ab	0,18 $\pm$ 0,1ab	76,6 $\pm$ 3,3	13,9 $\pm$ 0,4	0,12 $\pm$ 0,1	117,0 $\pm$ 6,2b
2015	AT-CT		9,1 $\pm$ 0,7b	0,10 $\pm$ 0,1b	209,1 $\pm$ 3,7b	16,1 $\pm$ 0,7bc	0,20 $\pm$ 0,1b	79,7 $\pm$ 1,7a
	AR-CT		9,9 $\pm$ 0,4b	0,08 $\pm$ 0,1ab	161,1 $\pm$ 12,7a	17,9 $\pm$ 0,3c	0,20 $\pm$ 0,1b	89,7 $\pm$ 0,5b
	ATc		7,8 $\pm$ 0,6ab	0,07 $\pm$ 0,1ab	187,3 $\pm$ 3,3ab	15,3 $\pm$ 0,6ab	0,16 $\pm$ 0,1a	93,5 $\pm$ 1,6b
	ARc		6,8 $\pm$ 0,6a	0,06 $\pm$ 0,1a	190,7 $\pm$ 4,8b	14,0 $\pm$ 0,4a	0,16 $\pm$ 0,1a	88,4 $\pm$ 2,6b
2013-2015	AT-CT		<b>10,9<math>\pm</math>0,9ns</b>	<b>0,14<math>\pm</math>0,1ns</b>	<b>121,8<math>\pm</math>5,8ns</b>	<b>11,5<math>\pm</math>0,9a</b>	<b>0,13<math>\pm</math>0,1ns</b>	<b>89,5<math>\pm</math>4,2a</b>
	AR-CT		<b>9,6<math>\pm</math>0,6</b>	<b>0,10<math>\pm</math>0,1</b>	<b>117,6<math>\pm</math>7,4</b>	<b>10,9<math>\pm</math>1,1a</b>	<b>0,12<math>\pm</math>0,1</b>	<b>104,9<math>\pm</math>2,8c</b>
	ATc		<b>9,2<math>\pm</math>0,6</b>	<b>0,10<math>\pm</math>0,1</b>	<b>127,6<math>\pm</math>3,2</b>	<b>14,9<math>\pm</math>0,4b</b>	<b>0,15<math>\pm</math>0,1</b>	<b>98,8<math>\pm</math>1,5b</b>
	ARc		<b>9,3<math>\pm</math>0,8</b>	<b>0,11<math>\pm</math>0,1</b>	<b>124,9<math>\pm</math>5,1</b>	<b>13,9<math>\pm</math>0,2b</b>	<b>0,14<math>\pm</math>0,1</b>	<b>98,2<math>\pm</math>1,1b</b>
2016	AT-CT		9,5 $\pm$ 0,4b	0,20 $\pm$ 0,1b	49,5 $\pm$ 1,8a	12,8 $\pm$ 0,9a	0,16 $\pm$ 0,01b	84,9 $\pm$ 1,5a
	AR-CT		5,3 $\pm$ 0,6a	0,08 $\pm$ 0,1a	59,9 $\pm$ 2,4b	14,1 $\pm$ 0,6b	0,15 $\pm$ 0,01a	98,5 $\pm$ 1,2c
	ATc		4,9 $\pm$ 0,1a	0,06 $\pm$ 0,1a	77,3 $\pm$ 1,9c	15,1 $\pm$ 0,5bc	0,16 $\pm$ 0,01b	96,1 $\pm$ 1,4c
	ARc		5,1 $\pm$ 0,2a	0,08 $\pm$ 0,1a	62,4 $\pm$ 2,0b	14,0 $\pm$ 0,3b	0,15 $\pm$ 0,01a	92,7 $\pm$ 1,6b
2017	AT-CT		6,9 $\pm$ 0,4b	0,10 $\pm$ 0,1ns	73,2 $\pm$ 4,3ns	13,4 $\pm$ 0,6ns	0,16 $\pm$ 0,1ns	82,9 $\pm$ 1,7a
	AR-CT		6,1 $\pm$ 1,2b	0,07 $\pm$ 0,1	88,3 $\pm$ 0,7	14,3 $\pm$ 0,5	0,15 $\pm$ 0,1	95,6 $\pm$ 1,1b
	ATc		5,9 $\pm$ 0,1a	0,08 $\pm$ 0,1	77,6 $\pm$ 2,2	15,1 $\pm$ 0,4	0,16 $\pm$ 0,1	96,1 $\pm$ 1,4b
	ARc		7,6 $\pm$ 0,2c	0,09 $\pm$ 0,1	87,3 $\pm$ 1,6	14,0 $\pm$ 0,3	0,15 $\pm$ 0,1	92,7 $\pm$ 1,6ab
2018	AT-CT		4,2 $\pm$ 0,6ns	0,106 $\pm$ 0,1ns	73,6 $\pm$ 10,3ns	13,4 $\pm$ 0,6ns	0,6 $\pm$ 0,1ns	86,4 $\pm$ 2,5a
	AR-CT		4,9 $\pm$ 0,7	0,07 $\pm$ 0,1	72,9 $\pm$ 11,5	14,1 $\pm$ 0,7	0,14 $\pm$ 0,1	116,6 $\pm$ 10,4b
	ATc		2,9 $\pm$ 0,3	0,04 $\pm$ 0,1	74,4 $\pm$ 5,9	14,5 $\pm$ 0,3	0,14 $\pm$ 0,1	106,5 $\pm$ 2,6b
	ARc		2,9 $\pm$ 0,3	0,03 $\pm$ 0,1	87,8 $\pm$ 8,4	12,9 $\pm$ 0,4	0,14 $\pm$ 0,1	100,2 $\pm$ 3,8b
2016-2018	AT-CT		<b>7,1<math>\pm</math>0,5b</b>	<b>0,12<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>65,4<math>\pm</math>5,5ns</b>	<b>12,8<math>\pm</math>0,5a</b>	<b>0,15<math>\pm</math>0,1ns</b>	<b>88,4<math>\pm</math>1,9a</b>
	AR-CT		<b>5,5<math>\pm</math>0,8a</b>	<b>0,08<math>\pm</math>0,1a</b>	<b>69,7<math>\pm</math>4,9</b>	<b>13,0<math>\pm</math>0,5a</b>	<b>0,13<math>\pm</math>0,1</b>	<b>99,1<math>\pm</math>1,6b</b>
	ATc		<b>4,8<math>\pm</math>0,2a</b>	<b>0,06<math>\pm</math>0,1a</b>	<b>76,4<math>\pm</math>3,3</b>	<b>15,0<math>\pm</math>0,2c</b>	<b>0,16<math>\pm</math>0,1</b>	<b>97,0<math>\pm</math>0,8b</b>
	ARc		<b>5,4<math>\pm</math>0,2a</b>	<b>0,08<math>\pm</math>0,1a</b>	<b>72,7<math>\pm</math>4,0</b>	<b>14,0<math>\pm</math>0,1b</b>	<b>0,15<math>\pm</math>0,1</b>	<b>94,5<math>\pm</math>0,9b</b>
2013-2018	AT-CT		8,7 $\pm$ 0,7b	0,13 $\pm$ 0,1b	90,1 $\pm$ 5,6ns	13,2 $\pm$ 0,4a	0,16 $\pm$ 0,1ns	141,3 $\pm$ 6,7a
	AR-CT		7,4 $\pm$ 0,7ab	0,09 $\pm$ 0,1a	93,4 $\pm$ 6,1	13,6 $\pm$ 0,4a	0,14 $\pm$ 0,1	142,3 $\pm$ 4,8a
	ATc		6,9 $\pm$ 0,4a	0,08 $\pm$ 0,1a	100,2 $\pm$ 3,3	14,8 $\pm$ 0,2b	0,15 $\pm$ 0,1	175,6 $\pm$ 3,4b
	ARc		7,4 $\pm$ 0,5ab	0,09 $\pm$ 0,1a	98,9 $\pm$ 4,5	13,4 $\pm$ 0,2a	0,14 $\pm$ 0,1	152,4 $\pm$ 5,0a

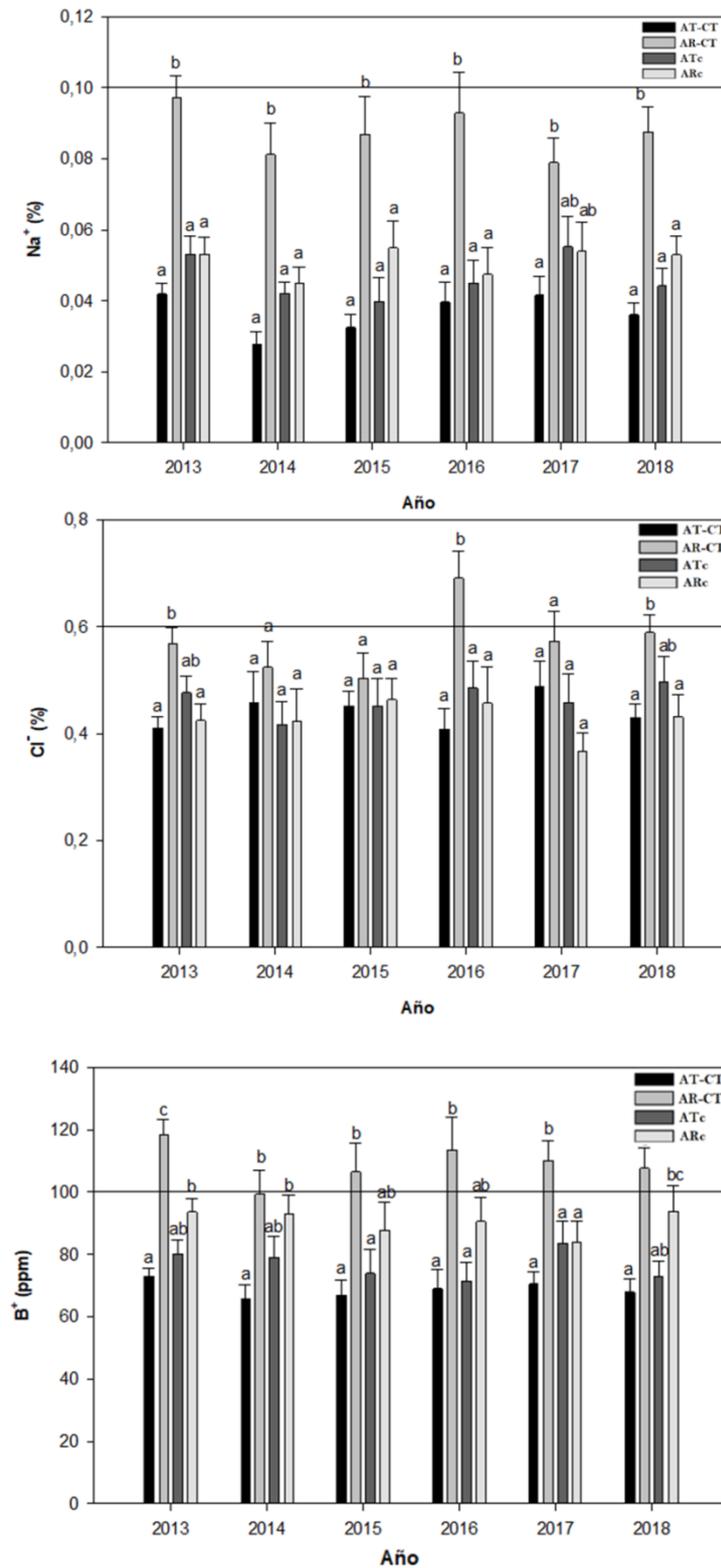
## Elementos fitotóxicos

Se analizaron los elementos fitotóxicos a nivel foliar durante la fase II de crecimiento del fruto (Figura IV.21). Como ya se mencionó, existe una gran disparidad en relación a los umbrales fitotóxicos foliares para los cultivos de cítricos (Labanauskas y Bitters et al., 1974; Grattam et al., 2013). En este trabajo se utilizaron los valores límite establecidos según Romero-Trigueros et al. (2014a) para el cultivo del pomelo de Na, Cl y B a partir de los cuales la producción de la cosecha se ve afectada: Na:  $0,1 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ , Cl:  $0,6 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  y B: 100 ppm. Aunque el pomelo “Star Ruby” puede presentar caídas de hoja todavía verdes (Hussain et al., 2012), como mecanismo de defensa para eliminar hojas que han acumulado iones tóxicos (Iglesias et al., 2007; Arbona et al., 2009), en nuestro caso, no se observaron signos visibles de toxicidad, ni caída repentina de hojas.

Para todo el periodo de estudio (2013-2018), el tratamiento AR-CT presentó las mayores concentraciones foliares de B, Na y Cl, al igual que en otros estudios (Romero-Trigueros., et al 2014; Nicolás et al., 2016), donde se evaluó este tipo de agua frente al agua del trasvase. En el caso del Na, ningún año se alcanzaron los valores límite establecidos para la afectación de la cosecha, algo que si ocurre para el B, tal y como se observó en otro estudio (Abadía et al., 2021) a lo largo de todo el ciclo evaluado, siendo los valores observados, significativamente mayores que el resto de tratamientos. Para todo el periodo experimental (2013-2018), se encontró una mayor concentración de Cl en hoja en AR-CT en comparación con el resto de tratamientos, tal y como se encontró en Nicolás et al. (2017), sin llegar a sobrepasar el umbral de toxicidad, excepto en el año 2016, como se encontró en Romero-Trigueros et al. (2014). Los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> no acumulan Na y Cl en hoja, aunque si lo hacen con el B, aunque por debajo del valor límite. Con la aplicación de este tipo de estrategia, no se produce una acumulación significativa de elementos fitotóxicos en hoja a lo largo plazo.



**Figura IV.21** Concentración de sodio (Na; %), cloro (Cl; %) y boro (B; ppm) en pomelo para los distintos tratamientos regados con AT y AR. Para cada año los valores corresponden al valor medio del periodo comprendido entre junio y septiembre (n=4). Cada histograma representa la media de ocho árboles  $\pm$  ES. Las barras sobre el histograma indican las diferencias estadísticas entre los diferentes tratamientos de acuerdo con ANOVA ( $p \leq 0.05$ ) y test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).



## Crecimiento vegetativo y productivo.

Se observaron diferencias significativas entre tratamientos en los parámetros de crecimiento vegetativo en los valores medios para el periodo a corto plazo (2013-2015) y para el periodo a largo plazo (2016-2018), así como para todo el periodo de estudio (2013-2018) (Tabla IV.21).

En el periodo a medio plazo (2013-2015) no se observaron diferencias significativas en el tamaño del dosel vegetal de AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> con respecto a AT-CT, mientras que el tratamiento que se vio más afectado fue el tratamiento AR-CT, que redujo significativamente su dosel vegetal un 17% con respecto al tratamiento control.

En el periodo a largo plazo (2016-2018), al igual que en el medio plazo, no se observaron diferencias significativas en el tamaño del dosel vegetal de AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> con respecto a AT-CT, siendo de nuevo AR-CT, el tratamiento más se vio afectado, con una reducción significativa del dosel vegetal del 34% para el periodo a largo plazo (2016-2018).

Para todo el periodo de estudio (2013-2018), al igual que en los periodos medio y largo plazo, no se observaron diferencias significativas en el crecimiento vegetativo para los tratamientos en los que se aplica la alternancia de agua con respecto al tratamiento control AT-CT. El tratamiento que redujo significativamente el dosel vegetal fue el tratamiento AR-CT, con un 25% de media respecto al tratamiento AT-CT. El riego con aguas regeneradas está asociado a una reducción del dosel vegetal, visto en otros trabajos por diversos autores como (García-Tejero et al., 2010; Pedrero et al., 2013; Pérez-Pérez et al 2015; 2016).

Para el valor medio de cada uno de los periodos de estudio, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a la producción total (Tabla IV.21). En el periodo medio-plazo (2013-2015), el valor medio de la producción para el tratamiento AT<sub>c</sub> disminuyó ligeramente con respecto a AT-CT un 7%. Cuando analizamos PT/DV entre tratamientos en el periodo (2013-2015), se observaron diferencias significativas entre AR-CT y el resto de tratamientos, siendo un 36% más elevada esta relación en AR-CT respecto al tratamiento AT-CT, debido a la fuerte disminución del DV.



Para el período a largo plazo (2016-2018), tampoco se observan diferencias significativas en los valores medios en la producción entre tratamientos, aunque los tratamientos AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> mostraron una disminución de su producción un 9% respecto a AT-CT. Las mayores diferencias se observaron de nuevo en PT/DV para el tratamiento AR-CT, el cual, experimentó un aumento significativo del 33% respecto al tratamiento AT-CT, al igual que en el periodo medio plazo, a la fuerte disminución del DV.

Para todo el periodo de estudio (2013-2018), al igual que en los periodos medio y largo plazo, no se observaron diferencias significativas en la producción total entre tratamientos. Sin embargo, el tratamiento AR-CT experimentó un aumento significativo PT/DV del 29% respecto del tratamiento control.

Aunque a nivel de productividad, la repercusión de la salinidad en los cítricos puede llegar a ser muy relevante (Iglesias et al., 2005), en nuestro caso, las diferencias mínimas existentes en la producción total, tienen mucho que ver con la capacidad del patrón para tolerar la salinidad (Stoney y Walker, 1999) de manera que no se observan diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a PT, aunque si pudimos verlas en cuanto a DV.

En otros estudios llevados a cabo en cítricos por diversos autores (García-Tejero et al., 2010; Pedrero et al., 2013, Pérez-Pérez et al., 2015 y Nicolás et al., 2016), se asocia el riego prolongado con AR con una reducción de la producción, debido a un menor volumen de la copa de los árboles, disminuyendo así la producción total del dosel vegetal. En nuestro caso, el tratamiento de AR-CT, vio reducido su dosel vegetal con respecto al tratamiento AT-CT a lo largo del periodo de estudio, pero no la producción de forma significativa, dando lugar a un aumento de la producción total del dosel vegetal.

Los altos niveles de Ni en las hojas y posiblemente flor del tratamiento AR-CT debido a la aplicación de agua regenerada durante todo el ciclo del cultivo (datos no mostrados), podría aumentar la actividad de ureasa y generar amoníaco. Incrementos en los niveles de amoníaco en las hojas, al igual que el boro, pueden causar un incremento en la inducción de la floración (Lovatt et al., 1988; Sagee et al., 1991). Es por ello, que aunque el tratamiento AR experimenta una reducción significativa del dosel vegetal, existe la posibilidad de que esta reducción no afecte de la misma manera a la producción. Así, se hace necesario prolongar este tipo de

estudios en el tiempo para observar los posibles efectos tanto positivos como negativos, relacionados con la aplicación de este tipo de aguas.

Análogamente a la producción total, la carga de frutos por árbol, al igual que ya se ha visto en otros estudios (Nicolás et al., 2016; Romero-Trigueros et al., 2017) se vio afectada por el tipo de agua y la estrategia de riego aplicada, aunque no se encontraron diferencias significativas en todo el periodo de estudio (2013-2018) (Tabla IV.21). En el periodo a medio plazo (2013-2015), no se observaron diferencias significativas en la carga de frutos, no obstante, el tratamiento AR<sub>c</sub> aumentó la carga un 3% respecto al tratamiento control AT-CT, siendo AT<sub>c</sub>, el tratamiento con menos carga, un 9% menor respecto al tratamiento de AT-CT. En el periodo a largo plazo (2016-2018), tampoco se vieron diferencias significativas entre tratamientos. AT-CT y AT<sub>c</sub> presentaron la mayor carga de frutos, siendo esta vez, AR<sub>c</sub>, el que vio reducida su carga un 7% en comparación con el tratamiento de AT-CT.

Para todo el periodo global del ensayo (2013-2018), los valores medios de peso de fruto no experimentaron diferencias significativas. En el periodo a medio plazo (2013-2015), destacó AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> respectivamente por su mayor y menor peso de fruto, respecto al tratamiento control AT, justificado por la carga de frutos de ambos tratamientos (mayor en AR<sub>c</sub> y menor en AT<sub>c</sub>). En el periodo a largo plazo (2016-2018), al igual que en el medio-plazo, las diferencias entre los valores medios de peso de fruto tampoco fueron significativas, aunque destaca AT<sub>c</sub>, como el tratamiento de menor peso, disminuyendo un 4% con respecto al del AT-CT (Tabla IV.21). Los resultados observados con AT-CT y AR-CT se han podido ver anteriormente en otros ensayos como en Romero-Trigueros et al.(2019).

A lo largo de todo el ensayo experimental (2013-2018), la productividad del agua se comportó de forma similar a la producción total, sin observarse diferencias significativas, como en Romero-Trigueros (2017), siendo el tratamiento de AT-CT, el de valores más elevados. En el periodo a medio plazo (2013-2015), AT<sub>c</sub>, fue el tratamiento con la menor productividad de agua, un 8% menor que el de AT-CT. Sin embargo, en el periodo a largo plazo (2016-2018) los tratamientos de alternancia de agua fueron los que obtuvieron la menor productividad de agua, con respecto a AT-CT, aunque no significativa.



**Tabla IV.21** Valores de volumen del dosel (VD; m<sup>3</sup>), cosecha (PT; Kg árbol<sup>-1</sup>), cosecha/dosel (PT/VD; kg m<sup>-3</sup>), carga de frutos (CF; frutos árbol<sup>-1</sup>), peso de fruto (PF; g), y productividad del agua (PA; kg m<sup>-3</sup>) para cada año (de 2013 a 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Los valores son medias ± SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD (P < 0.05).

Año	Tratamiento	VD	PT	PT/VD	CF	PF	PA
2013	AT-CT	26,3±0,7ns	185,4±17,0ns	6,9±0,5a	536,1±49,2ns	345,8±6,9ns	13,5±1,2ns
	AR-CT	21,6±1,0	191,1±9,8	9,2±0,6b	554,1±28,5	344,8±6,4	13,9±0,7
	ATc	23,5±0,6	166,6±4,2	7,1±0,1a	478,4±12,2	348,1±6,2	12,1±0,3
	ARc	25,1±1,0	188,2±14,4	7,4±0,4a	543,8±41,5	346,1±6,8	13,7±1,1
2014	AT-CT	26,2±0,6ns	231,6±13,5ns	8,8±0,3ab	698,6±36,7ns	331,4±7,1a	15,7±0,8ns
	AR-CT	22,8±2,2	211,1±13,5	11,1±1,4b	587,8±37,6	359,2±7,7b	14,3±0,9
	ATc	27,1±0,9	212,1±12,9	7,8±0,2a	600,1±36,3	353,5±8,3ab	14,4±0,8
	ARc	26,8±0,7	207,2±7,2	7,7±0,1a	620,1±21,4	334,2±5,6ab	14,1±0,4
2015	AT-CT	30,1±1,4ns	232,7±16,3ns	7,7±0,4a	607,4±42,5ns	383,1±7,8b	16,3±1,1ns
	AR-CT	24,1±1,6	244,4±6,8	11,5±1,5b	695,9±19,3	351,3±6,4a	17,2±0,4
	ATc	26,3±1,1	219,6±13,8	8,3±0,3ab	597,6±37,6	367,5±8,7ab	15,4±0,9
	ARc	30,1±1,4	248,8±13,6	8,2±0,3ab	729,1±39,9	341,3±7,3a	17,5±0,9
2013-2015	AT-CT	<b>27,5±0,9b</b>	<b>216,6±15,6ns</b>	<b>7,8±0,4a</b>	<b>614,1±42,8ns</b>	<b>353,5±7,3ns</b>	<b>15,2±1,0ns</b>
	AR-CT	<b>22,9±1,6a</b>	<b>215,6±10,1</b>	<b>10,6±1,2b</b>	<b>612,6±28,5</b>	<b>351,8±6,8</b>	<b>15,2±0,7</b>
	ATc	<b>25,6±0,8ab</b>	<b>199,4±10,3</b>	<b>7,7±0,2a</b>	<b>558,7±28,7</b>	<b>356,4±7,8</b>	<b>14,0±0,7</b>
	ARc	<b>27,3±1,1b</b>	<b>214,8±11,7</b>	<b>7,8±0,2a</b>	<b>630,9±34,3</b>	<b>340,5±6,6</b>	<b>15,1±0,8</b>
2016	AT-CT	32,7±1,5b	227,2±10,2ab	6,9±0,2ab	766,8±34,3a	296,3±11,1ab	16,5±0,7ab
	AR-CT	23,7±1,2a	239,3±6,1ab	10,5±0,6c	745,4±19,2a	321,0±11,3b	17,4±0,4ab
	ATc	31,3±1,2b	256,5±3,2b	8,2±0,2b	956,7±11,8b	268,1±4,4a	18,7±0,2b
	ARc	32,2±1,3b	208,1±15,3a	6,4±0,1a	690,1±31,6a	301,6±6,8ab	15,1±0,6a
2017	AT-CT	37,8±1,8b	302,2±15,3d	7,9±0,5b	755,6±44,2b	400,0±13,3ns	21,2±1,2b
	AR-CT	23,4±0,9a	274,6±4,6c	12,4±1,4c	719,6±14,1b	381,6±10,9	19,2±0,3b
	ATc	39,5±2,2b	217,6±11,7a	5,5±0,3a	567,1±35,1a	380,4±14,6	15,2±0,9a
	ARc	38,8±1,7b	260,9±5,2b	6,7±0,1ab	713,7±16,6b	365,6±9,2	18,3±0,4ab
2018	AT-CT	39,1±1,8b	236,5±6,5b	6,1±0,2a	612,5±19,4ns	386,1±14,8ns	17,2±0,5b
	AR-CT	25,1±1,0a	210,4±4,5a	8,7±0,9b	611,6±14,9	344,1±9,1	15,3±0,3a
	ATc	40,2±2,0b	223,5±2,7ab	5,7±0,2a	580,5±8,1	385,1±17,1	16,3±0,2ab
	ARc	41,8±1,5b	227,8±5,2ab	5,4±0,1a	581,7±15,4	391,6±13,3	16,6±0,4ab
2016-2018	AT-CT	<b>36,5±1,7b</b>	<b>255,3±10,7ns</b>	<b>7,1±0,3a</b>	<b>711,6±32,6ns</b>	<b>360,8±13,1ns</b>	<b>18,3±0,8ns</b>
	AR-CT	<b>24,1±1,0a</b>	<b>241,4±5,1</b>	<b>10,5±0,9b</b>	<b>692,2±16,1</b>	<b>348,9±10,4</b>	<b>17,3±0,4</b>
	ATc	<b>36,9±1,8b</b>	<b>232,5±5,8</b>	<b>6,5±0,2a</b>	<b>701,5±18,4</b>	<b>344,5±12,1</b>	<b>16,7±0,5</b>
	ARc	<b>37,6±1,5b</b>	<b>232,3±8,6</b>	<b>6,2±0,1a</b>	<b>661,8±21,2</b>	<b>352,9±9,8</b>	<b>16,7±0,5</b>
2013-2018	AT-CT	<b>31,4±0,8b</b>	<b>232,9±7,7ns</b>	<b>7,4±0,2a</b>	<b>660,9±20,9ns</b>	<b>354,9±4,5ns</b>	<b>16,5±0,5ns</b>
	AR-CT	<b>23,4±1,1a</b>	<b>227,2±5,4</b>	<b>10,5±0,4b</b>	<b>651,2±15,2</b>	<b>350,2±3,5</b>	<b>16,1±0,4</b>
	ATc	<b>30,5±1,1b</b>	<b>215,6±5,8</b>	<b>7,2±0,9a</b>	<b>635,2±26,5</b>	<b>352,1±4,6</b>	<b>15,3±0,4</b>
	ARc	<b>31,7±0,9b</b>	<b>221,6±5,8</b>	<b>7,1±0,2a</b>	<b>646,3±16,8</b>	<b>344,8±3,7</b>	<b>15,7±0,4</b>

## Calidad de la cosecha

Se observaron más diferencias significativas entre tratamientos para los diferentes parámetros de calidad de fruto en los valores medios del periodo a corto plazo (2013-2015), que para el periodo a largo plazo (2016-2018), en el que sólo se registraron diferencias significativas en el contenido en zumo. Para todo el ciclo (2013-2018), se observaron diferencias significativas en el CSS y en la  $A_T$ .

En el periodo a medio plazo (2013-2015), respecto al diámetro de fruto (D), éste fue similar entre tratamientos, sin observarse diferencias significativas. Para los valores medios de espesor de corteza, el AT-CT fue el tratamiento que presentó significativamente valores más altos (8,8 mm), siendo en este caso, el tratamiento  $AT_c$  y AR-CT los tratamientos que presentaron significativamente valores más bajos (8,3 mm) (Tabla IV.22). En el caso de AR-CT, este hecho fue descrito en otros trabajos (Nicolás et al., 2016; Romero-Trigueros et al., 2017). Con respecto al CSS, se observaron diferencias significativas entre el tratamiento AT-CT y el resto de tratamientos, siendo AT-CT el tratamiento con menor CSS. Respecto a la acidez titulable, el tratamiento  $AR_c$ , fue el que presentó los valores medios de acidez significativamente más altos con respecto al resto de tratamientos, un 7% más que AT-CT (Tabla IV.22).

En el periodo a largo plazo (2016-2018), no se observaron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros. El tratamiento AT-CT tuvo el valor más bajo de espesor de corteza, dando un fruto con mayor contenido en zumo, al contrario de lo que sucedía en el periodo 2013-2015, invirtiéndose la tendencia con respecto al primer periodo. Las diferencias más significativas las encontramos en el contenido en zumo, siendo el tratamiento AT-CT el de mayor contenido en zumo, y el tratamiento  $AT_c$  el que presentó significativamente el menor contenido en zumo, con un 9% menos respecto al tratamiento AT-CT (Tabla IV.22). Tampoco se mostró una relación directa entre el contenido en zumo y el espesor de corteza entre tratamientos regados con AR y AT.

Para todo el ciclo de estudio (2013-2018), no se observaron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros, a excepción del CSS y la  $A_T$ . El tratamiento AT-CT presentó un 13% menos significativamente de CSS y de  $A_T$ , respecto a los tratamientos de alternancia de aguas ( $AT_c$  y  $AR_c$ ), aunque este aspecto no influyó en el IM de los frutos debido a que el incremento de ambos parámetros (CSS y  $A_T$ ) fue similar.



**Tabla IV.22** Parámetros de calidad de fruto: Diámetro (D; cm), espesor de corteza (EC; mm), contenido de zumo (CZ; %), sólidos solubles (CSS; °Brix), acidez titulable (A<sub>T</sub>; %) e índice de madurez (IM; CSS/AT ratio) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media ± SE de 100 frutos por tratamiento (25 frutos por repetición). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD test (P < 0.05).

Año	Tratamiento	D	EC	CZ	CSS	A <sub>T</sub>	IM
2013	AT-CT	99,1±0,9ns	8,1±0,3ns	148,5±3,5ns	8,3±0,4a	1,8±0,1ab	4,6±0,1ns
	AR-CT	99,2±0,9	7,5±0,2	151,9±3,8	9,7±0,2b	1,9±0,1b	4,9±0,2
	ATc	98,4±0,7	7,4±0,2	154,8±3,6	8,8±0,3ab	1,8±0,1a	4,9±0,1
	ARc	96,2±1,0	7,8±0,2	144,9±3,9	9,4±0,3ab	1,9±0,1ab	4,8±0,1
2014	AT-CT	94,0±1,1ns	9,4±0,2b	148,5±4,5ns	8,4±0,1ns	1,6±0,1ab	5,1±0,1b
	AR-CT	95,7±0,9	8,3±0,3a	157,5±5,2	8,4±0,1	1,7±0,1a	4,9±0,1ab
	ATc	95,6±1,3	8,9±0,3ab	161,7±5,3	8,6±0,2	1,7±0,1ab	5,0±0,1ab
	ARc	94,1±1,2	8,8±0,2ab	151,3±3,4	8,8±0,1	1,8±0,1b	4,8±0,1a
2015	AT-CT	104,8±1,2b	9,1±0,3ns	174,8±3,5b	8,8±0,1a	1,9±0,1ns	4,7±0,1ns
	AR-CT	101,6±0,7ab	8,9±0,3	157,9±4,7a	9,7±0,1bc	1,9±0,1	5,0±0,2
	ATc	103,5±1,1ab	8,4±0,2	168,5±3,9ab	10,0±0,3c	2,0±0,1	4,9±0,1
	ARc	100,8±1,0a	8,6±0,2	161,9±3,7ab	9,1±0,2b	1,9±0,1	4,9±0,1
<b>2013-2015</b>	<b>AT-CT</b>	<b>99,3±1,1ns</b>	<b>8,8±0,3b</b>	<b>157,2±3,8ns</b>	<b>8,5±0,2a</b>	<b>1,8±0,1a</b>	<b>4,8±0,1ns</b>
	<b>AR-CT</b>	<b>98,8±0,9</b>	<b>8,3±0,2a</b>	<b>155,8±4,6</b>	<b>9,3±0,2b</b>	<b>1,9±0,1a</b>	<b>4,9±0,1</b>
	<b>ATc</b>	<b>99,2±1,0</b>	<b>8,3±0,2a</b>	<b>161,6±4,3</b>	<b>9,1±0,2b</b>	<b>1,8±0,1a</b>	<b>4,9±0,1</b>
	<b>ARc</b>	<b>97,1±1,1</b>	<b>8,4±0,2ab</b>	<b>152,7±3,7</b>	<b>9,1±0,2b</b>	<b>1,9±0,1b</b>	<b>4,8±0,1</b>
2016	AT-CT	91,8±1,3a	7,5±0,3ns	150,4±5,4b	9,3±0,1a	1,8±0,1a	5,2±0,1a
	AR-CT	97,5±2,2b	8,0±0,3	160,8±5,3b	10,2±0,3b	1,8±0,1ab	5,5±0,3ab
	ATc	88,5±0,6a	7,2±0,2	130,0±3,4a	11,0±0,6c	2,0±0,1c	5,3±0,2ab
	ARc	92,6±0,8ab	7,5±0,3	144,0±4,0ab	11,0±0,2c	1,9±0,1bc	5,6±0,2b
2017	AT-CT	105,7±1,4ns	8,3±0,3ns	196,7±5,6b	9,8±0,1a	1,7±0,1a	5,7±0,1a
	AR-CT	105,3±1,3	8,5±0,2	168,0±6,8a	10,6±0,6a	1,7±0,1b	6,0±0,3ab
	ATc	104,1±1,6	8,9±0,4	182,4±6,9ab	12,1±0,8b	1,9±0,1c	5,8±0,4ab
	ARc	101,9±1,0	8,9±0,3	174,7±5,8ab	12,9±0,2b	1,9±0,1c	6,6±0,3b
2018	AT-CT	102,8±1,5b	8,9±0,3ns	176,2±8,9ns	11,9±0,2b	2,0±0,1a	5,9±0,2b
	AR-CT	96,5±0,9a	8,9±0,3	167,0±5,5	11,2±0,2a	2,1±0,1a	5,4±0,1ab
	ATc	102,0±1,7b	9,3±0,4	162,2±6,7	11,6±0,1ab	2,4±0,1b	4,9±0,2a
	ARc	102,5±1,3b	9,6±0,3	185,2±7,2	11,4±0,1ab	2,3±0,1b	4,9±0,2a
<b>2016-2018</b>	<b>AT-CT</b>	<b>100,1±1,4ns</b>	<b>8,3±0,3ns</b>	<b>174,5±6,7b</b>	<b>10,3±0,2ns</b>	<b>1,8±0,1ns</b>	<b>5,6±0,1ns</b>
	<b>AR-CT</b>	<b>99,8±1,5</b>	<b>8,5±0,3</b>	<b>165,3±5,9ab</b>	<b>10,6±0,4</b>	<b>1,8±0,1</b>	<b>5,7±0,2</b>
	<b>ATc</b>	<b>98,2±1,3</b>	<b>8,4±0,3</b>	<b>158,2±5,7a</b>	<b>11,6±0,5</b>	<b>2,1±0,1</b>	<b>5,5±0,3</b>
	<b>ARc</b>	<b>99,0±1,0</b>	<b>8,7±0,3</b>	<b>167,9±5,7ab</b>	<b>11,8±0,2</b>	<b>2,1±0,1</b>	<b>5,6±0,2</b>
<b>2013-2018</b>	<b>AT-CT</b>	<b>99,5±4,5ns</b>	<b>8,6±0,6ns</b>	<b>161,5±0,1ns</b>	<b>9,6±0,2a</b>	<b>1,8±0,1a</b>	<b>5,3±0,1ns</b>
	<b>AR-CT</b>	<b>99,1±3,5</b>	<b>8,3±0,5</b>	<b>158,5±0,1</b>	<b>10,2±0,1b</b>	<b>1,9±0,1a</b>	<b>5,4±0,1</b>
	<b>ATc</b>	<b>98,8±4,6</b>	<b>8,2±0,6</b>	<b>159,9±0,1</b>	<b>10,8±0,2b</b>	<b>2,1±0,1b</b>	<b>5,3±0,1</b>
	<b>ARc</b>	<b>97,6±3,7</b>	<b>8,4±0,5</b>	<b>156,5±0,1</b>	<b>10,8±0,2b</b>	<b>2,1±0,1b</b>	<b>5,4±0,1</b>

## Conclusiones

Dada la particularidad de la Región de Murcia, con unas características únicas, tanto en su clima como en su agricultura, el uso de RHNC, se hace cada día más necesario. El futuro de la agricultura en el sureste español depende en gran medida de la gestión de este tipo de recursos, ya que el AR tendrá un papel cada vez más relevante como recurso hídrico para la viabilidad de los regadíos en la Región. En este sentido, es fundamental el estudio del riego con este tipo de aguas, adoptando el manejo apropiado en cada cultivo, introduciendo nuevas estrategias de fertirriego, en nuestro caso los cítricos y más concretamente, en pomelo. Este cultivo ha experimentado un auge importante en la Región de Murcia en los últimos años. Para este estudio, se ha escogido esta variedad de cítrico, con un patrón tolerante a la salinidad, como es el patrón Macrofila (*Citrus Macrophylla*), para evaluar la viabilidad y sostenibilidad de la utilización de AR a largo plazo.

A lo largo del ensayo se han evaluado los efectos a medio y largo plazo, no sólo de la utilización de una fuente de agua salina como es el AR, sino de la aplicación de estrategias de riego en la que se alternan dos fuentes de agua, AT y AR, sobre la fisiología de la planta, producción y calidad de la cosecha.

Se observaron aspectos positivos a largo plazo en este tipo de estrategias:

- i) La alternancia de agua no afecta de manera negativa en el tamaño del dosel vegetal, equiparándose al tratamiento control y consiguiendo un ahorro considerable de AT. Para todo el periodo del ensayo (2013-2018), en el tratamiento AT<sub>c</sub>, se produjo un ahorro del 39% de AT y un 61% para el tratamiento AR<sub>c</sub>.
- ii) Aunque el riego prolongado con AR afectó negativamente al dosel vegetal, no lo hizo en la producción total del mismo, dando lugar a una mayor productividad del agua.
- iii) Para el tratamiento AR<sub>c</sub>, la calidad de fruto se vio afectada de manera positiva, incrementándose un 11% el CSS.
- iv) La alternancia de fuentes de agua no produce una acumulación de elementos fitotóxicos en hoja, incrementando en septiembre A y g<sub>s</sub>.

Sin embargo, también se encontraron aspectos negativos en este tipo de estrategias:

- i) El riego prolongado con AR aumentó considerablemente los valores de RAS<sub>s</sub> y CROSS<sub>s</sub>, influyendo negativamente en la estructura del suelo;
- ii) El AR-CT disminuyó el tamaño del dosel vegetal, la carga del frutos y la producción, comparado con AT-CT;
- iii) La alternancia de agua, afectó de manera negativa, aunque no significativa en la producción y carga de fruto, disminuyendo la



productividad del agua en comparación con AT; iv) El uso prolongado de AR provocó estrés salino, dando como consecuencia una acumulación de elementos fitotóxicos en la hoja, disminuyendo los niveles de A y g<sub>s</sub>.

En este estudio, se muestra la viabilidad a largo plazo del uso de AR salina junto con estrategias de riego como la alternancia de fuentes de agua de distinta calidad (AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub>), en términos de producción y calidad de la fruta. Debe ponerse en valor el tipo de cultivo, y considerarse el portainjerto utilizado, ya que, condicionará la sostenibilidad del cultivo cuando se empleen fuentes de agua como el AR. Se ha demostrado que, el fertirriego con AR y la aplicación de estrategias de alternancia de agua, es viable a largo plazo en el cultivo del pomelo. Sin embargo, sería conveniente continuar evaluando este tipo de ensayos, más allá de este periodo de estudio, para ver realmente la sostenibilidad de este tipo de estrategias para un periodo de más de 6 años.

Aunque se han demostrado los beneficios del uso del AR, también debe optimizarse el manejo de la misma, ya que una mala práctica en el fertirriego podría conllevar consecuencias no deseables, como degradación de la estructura del suelo, contaminación de acuíferos y toxicidad vegetal por sales debido al uso del AR. El mal uso del AR puede dar lugar a la acumulación de sales solubles en el suelo (Grattan et al., 2015; Bastida et al., 2017; Zolti et al., 2019), afectando al crecimiento, la producción, rendimiento y sostenibilidad de los cultivos. Por tanto, es evidente la importancia de abordar este tipo de ensayos para el futuro de la agricultura en estas regiones, además de suponer un ahorro considerable de otros recursos considerados de buena calidad agronómica como es el AT. A su vez, sería muy interesante realizar este tipo de ensayos en otros cultivos, para asegurar la sostenibilidad agronómica, ambiental y económica para el sector agrario.

# **CAPÍTULO V.**

## **CONCLUSIONES**





A continuación, se detallan las principales conclusiones derivadas del presente trabajo de investigación:

**1. Se demostró la idoneidad de los diferentes indicadores térmicos relacionados con la temperatura del dosel, medidos por IRT para determinar el estado hídrico de pomelos en condiciones de salinidad (AR) y estrés hídrico (RDC):**

- 1.1 Se consiguieron NWSBs precisas para una adecuada gestión del riego con estrategias de AR y de riego deficitario, identificando el indicador térmico más apropiado, así como el mejor momento del día para realizar las lecturas. El tramo horario en el cual se deben tomar los datos, influye directamente sobre los indicadores principales que constituyen la base para poder conocer el estado hídrico de la planta, ya que a lo largo del día la variación de la temperatura del dosel vegetal y el DPV, así como el ángulo de incidencia del sol es fundamental.
- 1.2 Se ajustaron los promedios de  $T_c - T_a$  cada 60 minutos, consiguiendo un mejor ajuste. Al estar los datos de la NWSB directamente relacionados con el clima, lo que supone una dependencia directa de los parámetros de radiación solar ( $R_s$ ) y el déficit de presión de vapor (DPV), el período de ensayo se dividió en tres subperíodos, para mejor comprensión de los datos.
- 1.3 Los datos más precisos de CWSI se encontraron a las 10.00 GMT para todos los tratamientos excepto para AR-RDC en P3, que se encontraron a las 12.00 GMT. Esto nos lleva a entender que los resultados se vieron notablemente influenciados por el régimen de riego. Así, el régimen de riego influyó de manera que, al principio del período de estrés hídrico, el tratamiento con valores superiores de CWSI fue AT-RDC, en período medio, el mayor CWSI se encontró en los tratamientos AR y en el último período de estrés hídrico, AT-RDC fue el tratamiento con el CWSI más alto.

## 2. Evolución estacional y correlaciones entre los indicadores térmicos ( $T_c$ , $T_c-T_a$ y CWSI) obtenidos por Termometría y Relaciones Hídricas ( $\Psi_{stem}$ ):

- 2.1  $T_c$  se vio influida en gran medida por el DPV. En P1 AT-RDC tuvo niveles significativamente más altos que el resto de los tratamientos. En P2  $T_c$  disminuyó con respecto a P1, siendo los tratamientos AR los que alcanzaron los valores más altos de  $T_c$ . En P3  $T_c$  volvió a disminuir y AT-RDC tuvo valores superiores al resto de los tratamientos.
- 2.2 Se observó la misma tendencia en  $T_c-T_a$  que, en  $T_c$ , aunque los valores en P3 fueron mayores que en P2 porque  $T_a$  disminuyó en mayor medida que  $T_c$ . Los doseles totalmente regados fueron más fríos, dando valores de  $T_c-T_a$  más negativos que los tratamientos estrés, excepto AR-RDC en P3, que mostró sus valores máximos a las 12.00 GMT.
- 2.3 Las principales diferencias entre el CWSI de los árboles del tratamiento control y los distintos tratamientos de estrés fueron para AT-RDC en P1 y P3, para AR-CT en P2 y para AR-RDC en P3.
- 2.4 Al representar los indicadores térmicos derivados de la termometría frente al potencial hídrico de tallo, se observaron regresiones lineales significativas en todos los casos. El mayor coeficiente de correlación lo encontramos en la relación de CWSI frente a  $\Psi_{tallo}$ . El CWSI de los árboles AR y RDC era más alto y el  $\Psi_{tallo}$  más bajo, debido probablemente a una disminución de la conductancia estomática en respuesta al riego y al estrés salino. Por lo tanto, el indicador que tuvo mayor nivel de concordancia con el potencial hídrico de tallo fue el CWSI, aunque  $T_c$  y  $T_c-T_a$  estaban significativamente correlacionados.



**3. Se demostró la diferencia hidrodinámica para dos especies de cítricos como son pomelo y mandarino bajo condiciones de estrés hídrico y salino:**

- 3.1 En el cultivo del pomelo, el uso de AR y la supresión del riego afectaron negativamente a la fisiología de la planta, siendo el tratamiento que combinaba ambos estreses (AR-nI) el que más afectó al estado hídrico. En cambio, en mandarino los árboles sometidos a estrés salino (AR-CT) acumularon sales como estrategia osmótica. El tratamiento que más afectó al estado hídrico fue el AT-nI, llegando a presentar señales de senescencia, debido al agotamiento del agua del perfil del suelo y en consecuencia una caída crítica de  $\Psi_1$ .
- 3.2 Los mandarinos mostraron un comportamiento más anisohídrico en comparación con los pomelos, pero isohidrodinámico, manteniendo relativamente constante el gradiente de potencial hídrico hidrodinámico de las raíces a los brotes ( $\Delta\Psi_{\text{planta}}$ ) a través de variaciones en la conductancia estomática ( $g_s$ ) y el potencial hídrico del suelo.
- 3.3 El pomelo mostró un patrón isohídrico que limitó el uso de  $\Psi_1$  como indicador del estado hídrico de la planta. Su estado hídrico se vio afectado por la salinidad y el estrés hídrico, principalmente por la combinación de ambos.
- 3.4 Por otro lado,  $g_s$  sí que se mostró como un buen indicador del estado hídrico de la planta para la programación de riego en ambas especies, correlacionando fuertemente el tallo  $K_{\text{raíz}}$  con el aumento diurno del DPV y el agotamiento del perfil del suelo.
- 3.5 El ABA no mostró ningún efecto sobre la regulación estomática, destacando el papel fundamental de la hidráulica de la planta en el cierre estomático. En este caso, el hecho de que  $g_s$  no se correlacionara con el ABA foliar, sugería que la importancia del ABA en control de  $g_s$  tenía menor peso que la conductancia hidráulica.

4. **El uso de aguas regeneradas (AR) junto con la aplicación de estrategias de riego como el riego deficitario controlado (RDC) a medio-largo plazo no afecta negativamente a la cosecha ni a la calidad de la misma en el cultivo de pomelo y mandarino:**
- 4.1 En general, el riego con AR dio lugar a un aumento en el tamaño de los frutos con respecto a AT en el cultivo de mandarino. A largo plazo, AR redujo el porcentaje de cosecha de manera no significativa, traduciéndose en un aumento del tamaño de los frutos, lo que supuso a su vez, un mayor contenido en zumo.
- 4.2 En mandarino, los tratamientos RDC, independientemente del tipo de agua, aumentaron la concentración de azúcares en el fruto. La acidez aumentó en proporción a los azúcares y como consecuencia de ello, no se vio afectando el índice de madurez (IM), con lo que, organolépticamente hablando, se traduce en un fruto de mejor calidad.
- 4.3 En pomelo, a diferencia que, en mandarino, el peso de los frutos del tratamiento con AR no aumentó comparado con el tratamiento con AT a largo plazo. Esto se debe principalmente a que el portainjerto del pomelo (*Citrus macrophylla*) es más resistente y tolerante a la salinidad que el de mandarino ("*Carrizo citrange*"), afectando en menor medida a la cosecha y por lo tanto al tamaño de los frutos.
- 4.4 Los tratamientos RDC en pomelo experimentaron un aumento en la concentración de azúcares sin que se viese afectada la acidez del fruto, lo que se traduce a su vez en una mejora en el índice de madurez (IM).
- 4.5 El estudio muestra la viabilidad a largo plazo de la utilización de aguas no convencionales como son las aguas regeneradas, junto con la aplicación de estrategias de ahorro de agua como el riego deficitario controlado a largo plazo en cítricos, en nuestro caso pomelo y mandarino. Este tipo de recursos y estrategias no afectan negativamente en la calidad del fruto a largo plazo, aunque tendrían que manejarse con cautela, ya que una mala gestión o manejo podría



tener consecuencias negativas tanto a nivel de degradación del suelo como de toxicidad en la planta por las sales.

**5. El uso de aguas regeneradas (AR) junto con la aplicación de estrategias de riego como la alternancia de fuentes de agua a medio-largo plazo no afecta negativamente a la cosecha ni a la calidad de la misma en el cultivo del mandarino:**

- 5.1 En general, la alternancia de fuentes de agua dio lugar a un aumento en el tamaño del dosel vegetal respecto a AT-CT, dando lugar a un aumento de la cosecha y, por tanto, una mayor carga de frutos en el árbol sin verse afectado el peso de los mismos.
- 5.2 La aplicación de AT<sub>c</sub> y AR<sub>c</sub> dio lugar a una mayor productividad del agua de riego a largo plazo.
- 5.3 La aplicación de este tipo de estrategias a largo plazo afectó de manera positiva a la calidad de la cosecha, aumentando el contenido de zumo y azúcares de los frutos, disminuyendo la acidez de los mismos y, por lo tanto, consiguiendo un mayor índice de madurez en comparación con el tratamiento control.
- 5.4 El estudio muestra la viabilidad a largo plazo de la utilización de aguas no convencionales como son las aguas regeneradas, junto con la aplicación de estrategias de ahorro de agua como la alternancia de fuentes de agua a largo plazo en cítricos, en nuestro caso mandarino. Este tipo de recursos y estrategias no afectan negativamente en la calidad del fruto a largo plazo, aunque tendrían que manejarse con cautela, ya que una mala gestión o manejo podría tener consecuencias negativas tanto a nivel de degradación del suelo como de toxicidad en la planta por las sales.

**6. El uso de aguas regeneradas (AR) junto con la aplicación de estrategias de riego como la alternancia de fuentes de agua a medio-largo plazo no afecta negativamente a la cosecha ni a la calidad de la misma en el cultivo del pomelo:**

- 6.1 En general, la alternancia de fuentes de agua no afectó de manera negativa en el tamaño del dosel vegetal respecto a AT-CT, equiparándose y consiguiendo un ahorro importante de un agua con gran valor agronómico como el agua de trasvase.
- 6.2 El riego prolongado con AR afectó negativamente al tamaño del dosel vegetal en el cultivo de pomelo, aunque no lo hizo en la relación PT/VD, dando lugar a una mayor productividad del agua.
- 6.3 La aplicación de este tipo de estrategias a largo plazo afectó de manera positiva a la calidad de la cosecha, aumentando la concentración de azúcares  $AT_c$  y  $AR_c$  respecto a AT-CT.
- 6.4 El estudio demuestra que el uso de aguas regeneradas salinas y la implementación de estrategias de ahorro de agua, como la alternancia de fuentes de agua a largo plazo, son viables para su aplicación en cultivos de cítricos, especialmente en el caso de pomelo. Estos recursos en enfoques no tienen un impacto negativo en la calidad del fruto a largo plazo, siempre y cuando se gestionen con precaución. Es importante tener cuidado en su manejo, ya que una gestión inadecuada podría tener consecuencias perjudiciales, como la degradación del suelo y toxicidad en las plantas debido a la acumulación de sales.

# **CAPÍTULO VI.**

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**





Abadía, F. Bastida, C. Romero-Trigueros, J.M. Bayona, A. Vera, C. García, J.J. Alarcón, E. Nicolás Interactions between soil microbial communities and agronomic behavior in a mandarin crop subjected to water deficit and irrigated with reclaimed water. *Agricultural Water Management* 247 (2021) 106749

Adrover M, Farrús E, Moyà G and Vadell J, Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following 10 years of treated wastewater irrigation. *J Environ Manage* 95:188–192

AEAS (Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento), (2020), El sector del agua urbana acrecienta su compromiso con el cambio climático y la economía circular y acredita ser clave para la recuperación.

AEDyR (Asociación Española de Desalación y Reutilización). [aedyr.com/cifras-reutilizacion-agua-espana](http://aedyr.com/cifras-reutilizacion-agua-espana)

Agrológica, (2022). Principales patrones en cítrico: Características y tabla. Disponible en: <http://blog.agrologica.es/principales-patrones-portainjertos-en-citricos-naranjo-limonero-mandarino-caracteristicas-tabla/>

Agromática, (2022). Breve guía sobre los patrones del limonero. Disponible en: <https://www.agromatica.es/breve-guia-sobre-los-patrones-del-limonero/>

Air quality in Europe – (2015) report. EEA Report 5/2015, European Environment Agency, Copenhagen.

Al-Yassin, A., (2005). Review: Adverse effects of salinity on Citrus. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7: 668-680.

Alma Delia López-García; Héctor Manuel Ortega-Escobar; Carlos Ramírez-Ayala “Caracterización fisicoquímica del agua residual urbano-industrial y su importancia en la agricultura.” (2016).

Alvarez-Gerding X, Espinoza C, Inostroza-Blancheteau C, ArceJohnson P. Molecular and physiological changes in response to salt stress in Citrus macrophylla W plants overexpressing Arabidopsis CBF3/DREB1A. *Plant Physiology and Biochemistry* (2015).

Albertini MV, Carcouet E, Paillly O, Gambotti C, Luro F and Berti L, Changes in organic acids and sugars during early stages of development of acidic and Acidless Citrus fruit. *J Agric Food Chem* 54:8335–8339 (2006).

Alla G Marchuk and Pichu Rengasamy 2010. Cation ratio of soil structural stability (CROSS)

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration. Paper 56. FAO. Roma (Italia). 300 p.

Anjum MA, (2008). Effect of NaCl concentrations in irrigation water on growth and polyamine metabolism in two citrus rootstocks with different levels of salinity tolerance. *Acta Physiol Plant* 30: 43-52.

Arbona A, López-Climent MF, Pérez-Clemente RM, Gómez-Cadenas A, (2009). Maintenance of a high photosynthetic performance is linked to flooding tolerance in citrus. *Environ Exp Bot* 66: 135-142.

Arias, A., Vallina, I., Lorenzo, Y., Komesli, O. T., Katsou, E., Feijoo, G., y Moreira, M. T. (2019). Water footprint of a decentralised wastewater treatment strategy based on membrane technology.

Asano, T., Burton, F.L., Leverenz, H.L., Tsuchihashi, R., Tchobanoglous, G., (2006). Agricultural irrigation with reclaimed water: on overview. In: Asano, T. (Ed.), *Water Reuse. Issues, Technologies and Applications*. Metcalf & Eddy/AECOM. McGraw Hill, New York.

Assouline, S., Narkis, K., (2013). Effect of long-term irrigation with treated wastewater on the root zone environment. *Vadose Zone J.* 12. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2012.0216>.

Ayers RS and Westcot DW, Water quality for agriculture, in FAO Irrigation and Drainage. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (1985) 29 Rev. 1, 174.



Avihai Zolti, Stefan J. Green, Evyatar Ben Mordechay, Yitzhak Hadar, Dror Minz. Root microbiome response to treated wastewater irrigation, (2019)

Ballester, C.; Castel, J.; Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. Response of clementina de nules citrus trees to summer déficit irrigation. Yield components and fruit composition. *Agric. Water Manag* (2011), 98, 1027–1032.

Ballester, C.; Castel, J.; Jiménez-Bello, M.A.; Castel, J.R.; Intrigliolo, D.S. Thermographic measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water déficit effects on fruit weight in citrus trees. *Agric. Water Manag* (2013), 122, 1–6.

Ballester, C.; Castel, J.; Testi, L.; Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. Can heat-pulse sap flow measurements be used as continuous water stress indicators of citrus trees *Irrig. Sci* (2013), doi:10.1007/s00271-012-0386-5.

Ballester, C.; Zarco-Tejada, P.J.; Nicolás, E.; Alarcón, J.J.; Fereres, E.; Intrigliolo, D.S.; Gonzalez-Dugo, V. Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precis. Agric* (2018), Accepted, doi:10.1007/s11119-017-9512-y.

BancoMundial;(2023); El agua en la agricultura; [ancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture](https://ancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture).

Banuls, J.; Serna, M.D.; Legaz, F.; Talon, M.; Primo-Millo, E. Growth and gas exchange parameters of Citrus plants stressed with different salts. *J. Plant Physiol* (1997), 150, 194–199.

Barbagallo, S.; Consoli, S.; Russo, A. A one-layer satellite surface energy balance for estimating evapotranspiration rates and crop water stress indexes. *Sensors* (2008), 9, 1–21.

Bardhan, G., Russo, D., Goldstein, D., Levy, G.J (2016). Changes in the hydraulic properties of a clay soil under long-term irrigation with treated wastewater. *Geoderma* 264, 1–9.

Bastida, I.F. Torres, C. Romero-Trigueros, P. Baldrian, T. V\_etrovský, J.M. Bayona, J.J. Alarc\_on, T. Hern\_andez, C. García, E. Nicol\_as (2017). Combined effects of reduced irrigation and water quality on the soil microbial community of a citrus orchard under semi-arid conditions

Bastida, F.; Torres, I.; Abadía, J.; Romero-Trigueros, C.; Ruiz-Navarro, A.; Alarcón, J.J.; García, C.; Nicolás, E. Comparing the impacts of drip irrigation by freshwater and reclaimed wastewater on the soil microbial community of ATo citrus species. *Agric. Water Manag* (2018), 203, 53–62.

Basheer L, Dag A, Yermiyahu U, Ben-Gal A, Zipori I and KeremZ, Effects of reclaimed wastewater irrigation and fertigation level on olive oil composition and quality. *J Sci Food Agric* **99**:6342–6349 (2019). <https://doi.org/10.1002/jsfa.9911>.

Bellvert, J.; Zarco-Tejada, P.J.; Girona, J.; Fereres, E. Mapping crop water stress index in a “Pinot-noir” vineyard: Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precis. Agric.* (2014), 15, 361–376.

Berni, J.A.J.; Zarco-Tejada, P.J.; Sepulcre-Canto, G.; Fereres, E.; Villalobos, F. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sens. Environ* (2009), 113, 2380–2388.

Bernstein L, Brown JW and Hayward HE, The influence of rootstock on growth and salt accumulation in stone-fruit trees and almonds. *Proc AmSoc Hortic Sci* 68:86–95 (1956).

BMA (Banco Mundial; [www.bancomundial.org/es/topic/water/overview](http://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview))



Boman, B (2001). Effects of Saline Irrigation Water on Florida Citrus. Final Report. Special Publication SJ2001-SP12. University of Florida, IFAS Indian River Research Education Center, Ft. Pierce, FL.

Boman, B.J., M. Zekri and E. Stove (2005). Managing salinity in citrus. HortTechnol. 15:108-112.

Brezmes J. Diseño de una nariz electrónica para la determinación no destructiva del grado de maduración de la fruta. (2001)

Bridger, G., Salutsky, M., & Starostka, R. (1962.). Micronutrient Sources, Metal Ammonium Phosphates as Fertilizers. Agricultural and food chemistry, 10 (3), 181- 188.

Brodribb, T.J.; Holbrook, N.M. Diurnal depression of leaf hydraulic conductance in a tropical tree species. Plant Cell Environ. (2004) ,27, 820–827.

Brodribb, T.J.; Jordan, G.J. Internal coordination between hydraulics and stomatal control in leaves. Plant Cell Environ. (2008), 31,1557–1564.

Brodribb, T.J.; McAdam, S.A.M. Evolution of the Stomatal Regulation of Plant Water Content. Plant Physiol. (2017), 174, 639–649.

Brodribb, T.J.; Holbrook, N.M. Stomatal closure during leaf dehydration, correlation with other leaf physiological traits. Plant Physiol. (2003), 132, 2166–2173.

Buckley, T.N. How do stomata respond to water status? New Phytol. (2019), 224, 21–36.

Buckley, T.N. Optimal carbon partitioning helps reconcile the apparent divergence between optimal and observed canopy profiles of photosynthetic capacity. New Phytol. (2021), 230, 2246–2260.

Butusov, M. y Jernelöv, A. Phosphorus: An Element that could have been called Lucifer. Springer, (2013). ISSN: 2191-5555

CARM-EUROPA, (2019). <http://murciaregioneuropea.es/-/la-region-de-murcia-es-la-tercera-comunidad-autonoma-en-la-produccion-de-mandarina>

CARM, (2020). Estadística Agraria de Murcia. Dirección General de Producciones y Mercados Agroalimentarios, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

CARM, (2021). Estadística Agraria de Murcia. Dirección General de Producciones y Mercados Agroalimentarios, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

CARM, (2022). Estadística Agraria de Murcia. Dirección General de Producciones y Mercados Agroalimentarios, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. [www.econet.carm.es/inicio/-rem/sicrem/PUdatosBasicos](http://www.econet.carm.es/inicio/-rem/sicrem/PUdatosBasicos).

Castro, P.; Puertolas, J.; Dodd, I.C. Stem girdling uncouples soybean stomatal conductance from leaf water potential by enhancing leaf xylem ABA concentration. *Environ. Exp. Bot.* (2019), 159, 149–156.

Castel, J.R., Bautista, I., Ramos, C., and Cruz, G. (1987). Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). *Irrig. Drain. Syst.* 1 (3), 205–217 <http://dx.doi.org/10.1007/BF01102930>.

Castel JR, Buj A (1990) Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrig Sci* 11:121–127.

CE, (2017). Comprender las políticas de la Unión Europea en Agricultura. Una asociación entre Europa y los agricultores. Comisión Europea, Dirección General de Comunicación. Dirección General de Comunicación. Información al ciudadano. Comisión Europea. PDF ISBN 978-92-79-59595-0. doi: 10.2775/24724 NA-02-16-625-ES-N.

CH,SEGURA.2021 [https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion21-27/docsdescarga/docplan2127/EsAE/EsAE\\_PH-PGRI\\_DHS.pdf](https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion21-27/docsdescarga/docplan2127/EsAE/EsAE_PH-PGRI_DHS.pdf)

CH.SEGURA.2021 <https://www.chsegura.es/es/cuenca/planificacion/planificacion-2015-2021/normativa.html>



Chapman, H.D.; Reuther, W.; Batchelor, L.D.; Weber, H.J. The mineral nutrition of citrus. In *The Citrus Industry*; Reuther, W., Ed.; University of California: Berkeley, CA, USA, (1968); Volume 2, pp. 127–289.

Christmann, A.A.; Hoffmann, T.; Teplova, I.; Grill, E.; Muller, A. Generation of active pools of abscisic acid revealed by in vivo Imaging of water-stressed *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* (2005), 137, 209–219.

Christmann, A.A.; Weiler, E.W.; Steudle, E.; Grill, E. Hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage. *Plant J.* (2007), 52, 167–174.

C.K Labanauskas, and W.P Bitters, (1974), The influence of Rootstocks and Interstocks on the Nutrient Concentrations in “Valencia” Orange Leaves. University of California, Riverside.

Cornel, P., Meda, A., & Bieker, S. (2011). Wastewater as a Source of Energy, Nutrients, and Service Water. *Treatise on water science*, 337-375

Cohen, S.; Cohen, Y. Field studies of leaf conductance response to environmental variables in Citrus (orange). *J. Appl. Ecol.* 1983, 20, 561–570.

Cohen, Y.; Alchanatis, V.; Meron, M.; Saranga, Y.; Tsipris, J. Estimation of leaf potential by thermal imagery and spatial analysis. *J. Exp. Bot.* (2005), 56, 1843–1852.

Conesa MR, García-Salinas MD, de la Rosa JM, Fernández-Trujillo JP, Domingo R and Pérez-Pastor A, Effects of déficit irrigation applied during fruit growth period of late mandarin trees on harvest quality cold storage and subsequent shelf-life. *Sci Hortic* 165:344–351(2014).

Corso, D.; Delzon, S.; Lamarque, L.J.; Cochard, H.; Torres-Ruiz, J.M.; King, A.; Brodribb, T. Neither xylem collapse, cavitation, or changing leaf conductance drive stomatal closure in wheat. *Plant Cell Environ.* (2020), 43, 854–865.

Creese, C.; Oberbauer, S.; Rundel, P.; Sack, L. Are fern stomatal responses to different stimuli coordinated? Testing responses to light, vapor pressure deficit, and CO<sub>2</sub> for diverse species grown under contrasting irradiances. *New Phytol.* (2014), 204, 92–104.

Crisosto C.H., Optimum procedures for ripening stone fruit, *Management of ripening fruit*, december (1994), 24–25

Cruz RT, Jordan WR, Drew MC (1992) Structural changes and associated reduction of hydraulic conductance in roots of *Sorghum bicolor* L. following exposure to water deficit. *Plant Physiol* 99:203–212

Cunningham, S.C. Photosynthetic responses to vapour pressure deficit in temperate and tropical evergreen rainforest trees of Australia. *Oecologia* (2005), 142, 521–528.

Da Silva, B.B., T.V. Ramana Rao, P.V. de Azevedo y C. Brito de Souza, (1995). Moisture stress quantification in a cotton crop with infrared thermometry. *Revista Brasileira de Agrometeorología*, 3: 45–51.

Dal Santo, S.; Palliotti, A.; Zenoni, S.; Tornielli, G.B.; Fasoli, M.; Paci, P.; Tombesi, S.; Frioni, T.; Silvestroni, O.; Bellincontro, A.; et al. Distinct transcriptome responses to water limitation in isohydric and anisohydric grapevine cultivars. *BMC Genom.* (2016), 17, 815.

Damour, G.; Simonneau, T.; Cochard, H.; Urban, L. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant Cell Environ.* (2010), 33, 1419–1438.

DeJongea, K.C.; Taghvaeian, S.; Trout, T.J.; Comas, L.H. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for Maize. *Agric. Water Manag.* (2015), 156, 51–62.

Dekoum V.M., Assaha A.U., Hirofumi S., Rashid A., Mahmoud W.Y. (2017). The role of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> transporters in salt stress adaptation in glycophytes. *Frontiers in Physiology* 8: 509. doi: 10.3389/fphys.2017.00509.



DeJongea, K.C.; Taghvaeian, S.; Trout, T.J.; Comas, L.H. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for Maize. *Agric. Water Manag.* (2015), 156, 51–62.

De la Casa, A., G. Ovando, A. Rodríguez y L. Bressanini, (2003). Evaluación del estrés hídrico en papa con datos de termometría infrarroja y humedad de suelo. Enviado a *Revista Técnica de Chile*.

Dodd, I.C. Root-to-shoot signalling: Assessing the roles of 'up' in the up and down world of long-distance signalling in planta. *Plant Soil* (2005), 274, 251–270.

Dodd, I.C. Abscisic acid and stomatal closure: A hydraulic conductance conundrum *New Phytol.* (2013), 197, 6–8.

Dos Santos, R. S.; Arge, L. W. P.; Costa, S. I.; Machado, N. D.; de Mello-Farias, P. C.; Rombaldi, C. V. and de Oliveira, A. C. (2015). Genetic regulation and the impact of omics in fruit ripening. *Plant Omics.* 8(2):78-88

Dzikiti, S.; Steppe, K.; Lemeur, R.; Milford, J.R. Whole-tree level water balance and its implications on stomatal oscillations in orange trees [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] under natural climatic conditions. *J. Exp. Bot.* (2007), 58, 1893–1901.

EACCE,(2019).[http://files.eacce.org.ma/pj/%5B1570627769%5DEspagne\\_Murcie\\_Agrume.pdf/](http://files.eacce.org.ma/pj/%5B1570627769%5DEspagne_Murcie_Agrume.pdf/)

Egea, G.; Padilla-Díaz, C.M.; Martínez, J.; Fernández, J.E.; Pérez-Ruiz, M. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. *Agric. Water Manag.* (2017), 187, 210–221.

Embleton TW, Jones WW, Labanauskas CK, Reuther W, (1973). Leaf analysis as diagnostic tool and a guide to fertilization. In: *The citrus industry* (Reuther W, ed), Vol 2, 2nd ed., Univ. of Calif., Berkeley (USA). pp: 184-210 and Appendix I, pp: 447-495.

ESAMUR. Entidad de Saneamiento y depuración de aguas residuales de la región de Murcia (Murcia Regional Government's Sanitation and Water Treatment Authority). (2017). Available online: <http://www.esamur.com> (accessed on 15th March 2017).

ESAMUR. Entidad de Saneamiento y depuración de aguas residuales de la región de Murcia (Murcia Regional Government's Sanitation and Water Treatment Authority). (2023). Available online: <http://www.esamur.com>

EUROPAL, (2020). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20200512IPR78921/el-parlamento-respalda-impulsar-la-reutilizacion-del-agua>

FAO, (2020). Agricultura Mundial: hacia los años 2015/2030. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Roma.

FAO, (2021). "El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020. (FAO).

Fellers PJ, Carter RD and Dejager G, Influence of the ratio of degrees brix to percent acid on consumer acceptance of processed modified grapefruit juice. *J FoodSci*53:513515(1988).<https://doi.org/10.1111/j.13652621.1988.tb07744.x>

FERAGUA, (2020). <https://feragua.com/lavozdelregadio/2019/12/19/la-ue-pretende-multiplicar-por-seis-la-reutilizacion-de-agua-en-el-regadio-de-aqui-a-2025/>

Fereres, E., Goldhamer, D.A., (1990). Deciduous fruit and nut trees. In: Irrigation of agricultural crops (Stewart BA & Nielsen DR, Eds.). American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. Monograph 30, pp: 987-1017.

Field, C.B.; Barros, V.R.; Dokken, D.J.; Mach, K.J.; Mastrandrea, M.D.; Bilir, T.E.; Bilir, M.; Chatterjee, K.L.; Ebi, Y.O.; Estrada, R.C.; Genova, B.; et al. IPCC, 2014: Climate Change (2014): Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2014



Flexas, J.; Bota, J.; Lorito, F.; Cornic, G.; Sharkey, T.D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biol.* (2004), 6, 269–279.

Flexas, J.; Ribas-Carbo, M.; Diaz-Espejo, A.; Galmes, J.; Medrano, H. Mesophyll conductance to CO<sub>2</sub>: Current knowledge and future prospects. *Plant Cell Environ.* (2008), 31, 602–621.

Forner-Giner, M.A.; Rodriguez-Gamir, J.; Primo-Millo, E. Hydraulic and Chemical Responses of Citrus Seedlings to Drought and Osmotic Stress. *J. Plant Growth Regul.* (2011), 30, 353–366.

Franks, P.J.; Drake, P.L.; Froend, R.H. Anisohydric but isohydrodynamic: Seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. *Plant Cell Environ.* (2007), 30, 19–30.

Froux, F.; Ducrey, M.; Dreyer, E.; Huc, R. Vulnerability to embolism differs in roots and shoots and among three Mediterranean conifers: Consequences for stomatal regulation of water loss? *Trees* (2005), 19, 137–144.

García-Tejero, I., Romero-Vicente, R., Jiménez-Bocanegra, J.A., Martínez-García, G., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L., (2010). Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality, and water productivity. *Agricultural Water Management*, 97(5): 689–699.

García-Tejero, I., Jimenez-Bocanegra, J. A., Martínez, G., Romero, R., Duran-Zuazo, V. H., & Muriel-Fernandez, J. L. (2010). Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard. *Agricultural Water Management*, 97, 614e622.

García-Tejero, I.; Durán-Zuazo, V.H.; Muriel-Fernández, J.L.; Jiménez-Bocanegra, J.A. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for irrigation scheduling in citrus orchards. *Funct. Plant Biol.* (2011), 38, 1–12.

García-Tejero, I.; Durán-Zuazo, V.H.; Arriaga, J.; Hernández, A.; Vélez, L.M.; Muriel-Fernández, J.L. Approach to assess infrared thermal imaging of almond trees under water-stress conditions. *Fruits* (2012), 67, 463–474.

García-Tejero, I.F.; Costa, J.M.; Egipto, R.; Lima, R.S.N.; Durán, V.H.; López, C.; Chaves, M.M. Thermal data to monitor crop-water status in irrigated Mediterranean viticulture. *Agric. Water Manag.* (2016), 176, 80–90.

García-Tejero, I.; Hernández, A.; Padilla-Díaz, C.M.; Diaz-Espejo, A.; Fernández, J.E. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. *Agric. Water Manag.* (2017), 188, 50–60

García-Tejero, I.; Rubio, A.E.; Viñuela, I.; Hernández, A.; Gutiérrez-GoRDCllo, S.; Rodríguez-Pleguezuelo, C.R.; Durán-Zuazo, V.H. Thermal imaging at plant level to assess the crop-water status in almond trees (cv. Guara) under deficit irrigation strategies. *Agric. Water Manag.* (2018), 208, 176–186, doi: 10.1016/j.agwat.2018.06.002.

García-Sánchez, F., Martínez, V., Jifon, J., Syvertsen, J.P., Grosser, J.W., (2002). Salinity reduces growth, gas exchange, chlorophyll and nutrient concentrations in diploid sour orange and related allotetraploid somatic hybrids. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 77 (4), 379–386.

García-Sánchez, F., Syvertsen, J.P., (2006). Salinity reduces growth, gas exchange, chlorophyll and nutrient concentrations in diploid sour orange and related allotetraploid somatic hybrids. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77: 379-386.

García-Sánchez, F., Pérez-Pérez, J.G., Botía, P. y Martínez, V. (2006). The response of young mandarin trees grown under saline conditions depends on the rootstock. *European Journal of Agronomy*, 24: 129-139.

García-Sánchez, F., Syvertsen, J.P., Gimeno, V., Botia, P., Perez-Perez, J.G., (2007). Responses to flooding and drought stress by ATo citrus rootstock



seedlings with different water-use efficiency. *Physiologia Plantarum*, 130(4): 532-542. doi: 10.1111/j.1399-3054.2007.00925.x

García-Sánchez F, Syvertsen JP, Martínez V, Melgar JC, (2002). Salinity tolerance of 'Valencia' orange tree on rootstocks with contrasting salt tolerance is not improved by moderate shade. *J Exp Bot* 57: 3697-3706.

García-Sánchez F, Syvertsen JP, Gimeno V, Botia P, Pérez-Pérez JG (2007) Responses to flooding and drought stress by two citrus rootstock seedlings with different water-use efficiency. *Physiol Plant* 130:532-542

Gao, J.; Zhao, P.; Shen, W.; Niu, J.; Zhu, L.; Ni, G. Biophysical limits to responses of water flux to vapor pressure deficit in seven tree species with contrasting land use regimes. *Agric. For. Meteorol.* (2015), 200, 258–269.

Gimeno, V.; Syvertsen, J.P.; Simon, I.; Martínez, V.; Cámara-Zapata, J.M.; Nieves, M.; García-Sánchez, F. Interstock of 'Valencia' Orange Affects the Flooding Tolerance in 'Verna' Lemon Trees. *Hortscience* (2012), 47, 403–409.

Girona, J.; Mata, M.; del Campo, J.; Arbonés, A.; Bartra, E.; Marsal, J. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci.* (2006), 24, 115–127.

Gimeno, V., Simón, I, Nieves, M., Martínez, V., Cámara-Zapata, J.M., García, A.L., García-Sánchez, F., (2012). The physiological and nutritional responses to an excess of boron by Verna lemon trees that were grafted on four contrasting rootstocks. *Trees*, 26:1513-1526

Giovannoni, J. J. (2004). Genetic regulation of fruit development and ripening. *The plant cell*. 16(1): S170-S180.

Ginestar C, Castel JR (1996) Response of young clementine citrus trees to water stress during different phenological periods. *J Horticult Sci* 71:551–559

Girona, J.; Mata, M.; del Campo, J.; Arbonés, A.; Bartra, E.; Marsal, J. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci.* (2006), 24, 115–127.

González-Altozano, P., Castel, J.R., (1999). Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 74: 706-713.

Google Map. <https://maps.google.com/>

Gómez-Bellot, M.J.; Nortes, P.A.; Sánchez-Blanco, M.J.; Ortuño, M.F. Sensitivity of thermal imaging and infrared thermometry to detect water status changes in *Euonymus japonica* plants irrigated with saline reclaimed water. *Biosyst. Eng.* (2015), 133, 21–32.

Gonzalez-Dugo, V.; Zarco-Tejada, P.J.; Nicolás, E.; Nortes, P.A.; Alarcón, J.J.; Intrigliolo, D.S.; Fereres, E. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precis. Agric.* (2013), 14, 660–678

Gonzalez-Dugo, V.; Zarco-Tejada, P.J.; Fereres, E. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. *Agric. For. Meteorol.* (2014), 198, 94–104, doi: 10.1016/j.agrformet.2014.08.003.

Global Water Market, Meeting the world's water and wastewater needs until 2020. *Global Water Intell* 1 (2017).4 ESAMUR. Entidad de saneamiento y depuración de aguas residuales de la Región de Murcia. 2017.

Grattan, S., (2013). Evaluation of the impact of Boron on citrus orchards in Riverside country. *Crop*. Adopted by Riverside County Water Task Force, 78p. Crop Salinity Consulting.

Grattan, S.R., Díaz, F.J., Pedrero, F., Vivaldi, G.A., (2015). Assessing the suitability of saline wastewaters for irrigation of *Citrus* spp.: emphasis on boron and specific-ion interactions. *Agricultural Water Management*, 157: 48–58.



Grassi, G.; Ripullone, F.; Borghetti, M.; Raddi, S.; Magnani, F. Contribution of diffusional and non-diffusional limitations to midday depression of photosynthesis in *Arbutus unedo* L. *Trees* (2009), 23, 1149–1161.

Grieve CM, Grattan SR and Maas EV, Plant salt tolerance, in *Agricultural Salinity Assessment and Management*, Vol. 71, 2nd edn, ed. by WallendaARW and Tanji KK. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*. AM Soc Civ Eng ASCE, Reston, VA, pp. 405–459 (2012).

Grossiord, C.; Buckley, T.N.; Cernusak, L.A.; Novick, K.A.; Poulter, B.; Siegwolf, R.T.W.; Sperry, J.S.; McDowell, N.G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytol.* (2020), 226, 1550–1566.

Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas; [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

Gucci, R.; Xiloyannis, C.; Flore, J.A. Gas-exchange parameters, water relations and carbohydrate partitioning in leaves of field-grown *Prunus domestica* following fruit removal. *Physiol. Plant.* (1991), 83, 497–505.

Hartmann, H.; Mathias, F.; Schuldt, B. A whole-plant perspective of isohydry: Stem-level support for leaf-level plant water regulation. *Tree Physiol.* (2021), 41, 901–905.

Hasegawa P.M. (2013). Sodium (Na<sup>+</sup>) homeostasis and salt tolerance of plants. *Environmental and Experimental Botany* 92: 19-31

Hernández-Santana, V.; Rodríguez-Domínguez, C.; Fernández, J.E.; Espejo-Díaz, A. Role of leaf hydraulic conductance in the regulation of stomatal conductance in almond and olive in response to water stress. *Tree Physiol.* (2016), 36, 725–735.

Hipps, L.E.; Asrar, G.; Kanemasu, E.T. A Theoretically-Based Normalization of Environmental-Effects on Foliage Temperature. *Agric. For Meteorol.* (1985), 35, 113–122.

Hilgeman RH, Sharp FO (1970) Response of Valencia orange trees to four soil water schedules during 20 years. *J Am Soc Hortic Sci* 95:739–745.

Hirzel, D.R., Steenwerth, K., Parikh, S.J., Oberholster, A., (2017). Impact of winery wastewater irrigation on soil, grape and wine composition. *Agric. Water Manag.* 180, 178–189.

Hochberg, U.; Degu, A.; Fait, A.; Rachmilevitch, S. Near isohydric grapevine cultivar displays higher photosynthetic efficiency and photorespiration rates under drought stress as compared with near anisohydric grapevine cultivar. *Physiol. Plant.* (2013), 147,443–452.

Hochberg, U.; Rockwell, F.E.; Holbrook, N.M.; Cochard, H. Iso/Anisohydry: A Plant-Environment Interaction Rather Than a Simple Hydraulic Trait. *Trends Plant Sci.* (2018), 23(2), 112–120.

Hulme A.C; Rhodes M.J., Pome fruits, en: *The biochemistry of fruits and their products Food science and technology 1: A series of monograph*, Ed. A.C. Hulme, Academic Press London and New York (1971) 333-373.

Hussain S, Luro F, Costantino G, Ollitrault P, Morillon R, (2012). Physiological analysis of salt stress behavior of citrus species and genera: Low chloride accumulation as an indicator of salt tolerance. *South Afr J Bot* 81: 103-112.

Hussain S, Luro F, Costantino G, Ollitrault P, Morillon R, (2012). Physiological analysis of salt stress behavior of citrus species and genera: Low chloride accumulation as an indicator of salt tolerance. *South Afr J Bot* 81: 103-112.

Iagua, (2014); Estruvita, el problema que se convirtió en solución; <https://www.iagua.es/blogs/elena-rama/estruvita-el-problema-que-se-onvirtio-en-solucion>

Iagua, (2021); La economía circular, el agua y la reutilización; <https://www.iagua.es/blogs/jose-antonio-diaz-lazaro/economia-circular-agua-y-reutilizacion>.



Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Reginato, R.J. Extending the “degree day” concept of plant phenological development to include water stress effects. *Ecology* (1978), 59, 431–433.

Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Pinter, P.J.; Reginato, R.J.; Hatfield, J.L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* (1981), 24, 45–55, doi:10.1016/0002-1571(81)90032-7.

Idso, S.B. y K.L. Clawson, (1986). Foliage temperature: effects of environmental factors with implications for plant water stress assesment and the CO<sub>2</sub>/Climate connection. *Water Resources Research*, 22(12): 1133-1138.

Iglesias, D.J; Gómez-Cadenas, A.; Moya, J.L; Arbona, V; Ibañez, V; Primo-Millo, E; Talón, M, (2005). Efectos de la Salinidad en los cítricos: Fundamentos fisiológicos y estrategias agronómicas para mejorar la tolerancia.

Iglesias D, Cercós M, Colmenero-Flores J, Naranjo M, Ríos G, Carrera E, Ruiz-Rivero O, Lliso I, Morillon R, Tadel F, (2007). Physiology of citrus fruiting. *Braz J Plant Physiol* 19: 333-362.

Indira Paudela, Asher Bar-Tala, Guy J. Levya, Nativ Rotbarta, Jhonathan E. Ephrathc, Shabtai Cohena. Treated wastewater irrigation: Soil variables and grapefruit tree performance *Agricultural Water Management* 204 (2018) 126–137  
Israelsson, M.; Siegel, R.S.; Young, J.; Hashimoto, M.; Iba, K.; Schroeder, J.I. Guard cell ABA and CO<sub>2</sub> signaling neATork updates and Ca<sup>2+</sup> sensor priming hypothesis. *Curr. Opin. Plant Biol.* (2006), 9, 654–663.

Jackson, R.D.; Idso, S.B.; Reginato, R.J.; Pinter, P.J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* (1981), 17, 1133–1138.

Jamshidi, S.; Zand-Parsa, S.; Niyogi, D. Assessing crop water stress index of citrus using in-situ measurements, landsat, and sentinel-2 data. *Int. J. Remote Sens.* (2021), 42, 1893–1916.

Jin Wu, Shawn P. Serbin, Kim S. Ely, Brett T. Wolfe, L. Turin Dickman, Charlotte Grossiord, Sean T. Michaletz, Adam D. Collins, Matteo Detto, Nate G. McDowell, S.

Joseph Wright, Alistair Rogers The response of stomatal conductance to seasonal drought in tropical forests. (2020)

Jones, H.G. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. Exp. Bot.* (2004), *55*, 2427–2436.

Knee M., Pome fruits, en *Biochemistry of food ripening* Ed. Seymour J.D., Taylor J.E., Tucker G.A., Chatman and hall, London U.K (1993) 325-345

La Cava ELM and Sgroppo SC, Evolution during refrigerated storage of bioactive compounds and quality characteristics of grapefruit [*Citrus paradisi* Macf.] juice treated with UV-C light. *LWT-Food Sci Technol* 632:1325–1333 (2015).

Langgut, D., (2017). The Citrus Route Revealed: From Southeast Asia into the Mediterranean. *Hortiscience*, *52*(6): 814–822. doi: 10.21273/HORTSCI11023-16.

Laslo E., Gyorgy E., Mara G., Szentes S., Salamon R.V., Andras C.D., Lanyi S., (2012), The management of N and P nutrition of plants using nitrogen fixing and phosphorus solubilizing bacteria, *Environmental Engineering and Management Journal*, **11**, 371–375.

Laurenson, S., Bolan, N.S., Smith, E., McCarthy, M., (2012). Review: use of recycled wastewater for irrigating grapevines. *Aust. J. Grape Wine Res.* <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00170.x>.

Lavrnić, S., Zapater-Pereyra, M., Mancini, M.L., (2017). Water Scarcity and Wastewater Reuse Standards in Southern Europe: Focus on Agriculture. *Water Air and Soil Pollution*, *228*(7). Número de artículo: 251. doi: 10.1007/s11270-017-3425-2.

Le Corre, K.S.; Valsami-Jones, E.; Hobbs, P. y Parsons, S.A. Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol 39:6, pp. 433–477, (2009), DOI: 10.1080/10643380701640573.

Leopold, A.C; Kriedemann P.E., *Plant growth and development*. Ed. McGraw Hill, 2 Nova York (1975) 16–34.



Levy, Y.; Kaufmann, M.R. Cycling of leaf conductance in citrus exposed to natural and controlled environments. *Can. J. Bot.* 1976, 54, 2215–2218.

Levy, Y., Bar-Akiva, A., Vaadia, Y., (1978). Influence of irrigation and environmental factors on grapefruit acidity. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 103: 73-76.

Levy, Y., Shalhevet, J., Bielorai, H., (1979). Effect of irrigation regime and water salinity on grapefruit quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 104: 356-359.

Levy, Y.; Shamhevet, J. Ranking the tolerance of citrus rootstocks by juice analysis. *Sci. Hortic.* (1990), 45, 89–98.

Levy, Y., Syvertsen, J.P., (2004). Irrigation water quality and salinity effects in citrus trees. *Horticultural Review*, 30: 37–82.

Levy, G.J., Assouline, S., (2010). Physical aspects. In: Levy, G.J.P., Fine, P., Bartal, A. (Eds.), *Treated Wastewater in Agriculture: Use and Impacts on the Soil Environment and Crops*. Wiley-Blackwell, UK, pp. 306–327.

Li, X. Research on reclaimed water from the past to the future: A review. *Environ. Develop. Sustain.* (2021).

Liang, J.S.; Zhang, J.H.; Wong, M.H. How do roots control xylem sap ABA concentration in response to soil drying? *Plant Cell Physiol.* (1997), 38, 10–16.

Lloyd J, Syvertsen JP, Kriedemann PE, (1987). Salinity effects on leaf water relations and gas exchange of 'Valencia' orange, *Citrus sinensis* (L.) Osbeck, on rootstocks with different salt exclusion characteristics. *Aust J Plant Physiol* 14: 605-617.

L. Shu, P. Schneider, V. Jegatheesan y J. Jonson, «An economic evaluation of phosphorous recovery as estruvite from digester supernatant, » *Bioresour. Technol*, vol. 97, pp. 2211-2216, (2006).

Lo Gullo MA, Nardini A, Salleo S, Tyree MT (1998) Changes in root hydraulic conductance ( $K_r$ ) of *Olea oleaster* seedlings following drought stress and irrigation. *New Phytol* 140:25–31

Carol J. Lovatt, Yusheng Zheng & Kater D. Merluza. (1988). Demostración de un cambio en el metabolismo del nitrógeno que influye en el inicio de la floración en los cítricos. páginas 181-188

Maas EV and Grattan SR, Crop yields as affected by salinity, in *Agricultural Drainage*. Agron. Monograph 38, ed. by Skaggs AR and vanSchilfgaarde J. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, pp. 55–108 (1999).

Maestre-Valero JF, Martin-Gorriz B, Alarcón JJ, Nicolás E and Martínez-Álvarez V, Economic feasibility of implementing regulated deficit irrigation with reclaimed water in a grapefruit orchard. *AgricWaterManage* 178:119–125 (2016).

MAGRAMA, (2020). Boletín Mensual de Estadística. Marzo 2020. Secretaría General Técnica, Subdirección General de Estadística. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Gobierno de España.

MAPA, 2020; Desarrollo de la campaña de cítricos 2020/2021.

Martínez-Alcántara, B.; Rodríguez-Gamir, J.; Martínez-Cuenca, M.R.; Iglesias, D.J.; Primo-Millo, E.; Forner-Giner, M.A. Relationship between hydraulic conductance and citrus dwarfing by the Flying Dragon rootstock (*Poncirus trifoliata* L. Raft var. *Monstrosa*). *Trees* (2013), 27, 629–638.

Martínez-Álvarez V, González-Real MM, Baille A, Maestre Valero JF and Gallego Elvira B, Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate. *Agric WaterManage* 95:1056–1066 (2008).

Maurer M and Davies F, Use of reclaimed water for irrigation and fertigation of young Redblush grapefruit trees. *Proc Fla State Hortic Soc* 106:22–30 (1993).



Martre P, North GB, Nobel PS (2001) Hydraulic conductance and mercury-sensitive water transport for roots of *Opuntia acanthocarpa* in relation to soil drying and rewetting. *Plant Physiol* 126:352–362

Matsumoto H and Ikoma Y, Effect of different postharvest temperatures on the accumulation of sugars, organic acids, and amino acids in the juice sacs of Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) fruit. *J Agric Food Chem* 60:9900–9909 (2012). <https://doi.org/10.1021/jf303532s20>

Maas, E.V. Salinity and citriculture. *Tree Physiol.* 1993, 12, 195–216.

McAdam, S.A.M.; Brodribb, T.J. Linking turgor with ABA biosynthesis: Implications for stomatal responses to vapour pressure deficit across land plants. *Plant Physiol.* (2016), 171, 00380.

McCutchan, H.; Shackel, K.A. Stem-water potential as a sensitive indicator of water-stress in prune trees (*Prunus-domestica* L cv French). *J. Am. Soc. Hort. Sci.* (1992), 117, 607–611.

Medina García, L. R. (2016). La agricultura, la salinidad y los hongos micorrízicos arbusculares: una necesidad, un problema y una alternativa. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 42-49

Meinzer, F.C.; Smith, D.D.; Woodruff, D.R.; Marias, D.E.; MacCulloh, K.A.; Howard, A.R.; Magedman, A.L. Stomatal kinetics and photosynthetic gas exchange along a continuum of isohydric to anisohydric regulation of plant water status. *Plant Cell Environ.* (2017), 40, 1618–1628.

Melgar, J.C., (2008). Leaf gas exchange, water relations, nutrient content and growth in citrus and olive seedlings under salinity. *Biology Plant*, 52:385-390.

Melgar, J.C., Mohamed, Y., Serrano, N., García-Galavis, P.A., Navarro, C., Parra, M.A., Benlloch, M., Fernández-Escobar, R., (2009). Long term responses of olive trees to salinity. *Agricultural Water Management*, 96: 1105–1113.

Mirás-Ávalos, J.M.; Pérez-Sarmiento, F.; Alcobendas, R.; Alarcón, J.J.; Mounzer, O.; Nicolás, E. Using midday stem water potential for scheduling deficit irrigation in mid-late maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Irrig. Sci.* (2016), 34, 161–173.

Mira-García, A.B. Evaluation of Physiological Indicators of Water Stress in Verna Lemon Tree. Master's Thesis, Orihuela Higher Polytechnic School, Miguel Hernández University of Elche, Elche, Spain, (2016).

Mitcham B., Kader A., Methods for determining quality of fresh horticultural commodities, *Perishables Handling newsletter*, University of California at Davis, August (1995), 1-11.

Miteco, 2019; Informe de seguimiento de los planes hidrológicos de cuenca y de los recursos hídricos en España (2019).

Miteco, (2021); Fomento de la Reutilización de las aguas Residuales.

Morgan KT, Wheaton TA, Parsons LR and CastleWS, Effects of reclaimed municipal waste water on horticultural characteristics, fruit quality and soil and leaf mineral concentration of citrus. *HortScience* 43:459–464 (2008).

Morgan KT, Effects of reclaimed water on citrus growth and productivity, in Einschlag, F.S.G Ed., *WasteWater – Evaluation and Management*. Intech, (2011) ISBN: 978-953-307-233-3. <https://www.intechopen.com/books/waste-water-evaluation-and-management/effects-of-reclaimed-water-on-citrus-growth-and-productivity>

Moran, M.S.; Clarke, T.R.; Inoue, Y.; Vidal, A. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* (1994), 49, 246–263.

Mott, K.A.; Peak, D. Stomatal responses to humidity and temperature in darkness. *Plant Cell Environ.* 2010, 33, 1084–1090.



Mounzer, O., Pedrero, F., Nortes, P.A., Bayona, J.M., Nicolás, E. y Alarcón, J.J., (2013). Transient soil salinity under the combined effect of reclaimed water and regulated deficit drip irrigation of Mandarin trees. *Agricultural Water Management*, 120: 23–29.

Mrad, A.; Sevanto, S.; Domec, J.-C.; Liu, Y.; Nakad, M.; Katul, G. A Dynamic Optimality Principle for Water Use Strategies Explains Isohydric to Anisohydric Plant Responses to Drought. *Front. For. Glob. Change* (2019), 2, 49.

Munns R.H., Tester M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review Plant Biology* 59: 651-681.

Munns R., Gilliam M. (2015). Salinity tolerance of crops-what is the cost? *New Phytologist* 208: 668-673.

Naser A. Anjum, Nafees Khan, S. Singh Gill, Rahat Nazar, (2008). Photosynthetic traits and activities of antioxidant enzymes in blackgram (*Vigna mungo* L. Hepper) under cadmium stress.

Navarro JM, Pérez-Pérez JG, Romero P and Botía P, Analysis of the changes in quality in mandarin fruit, produced by deficit irrigation treatments. *Food Chem* 119:1591–1596 (2010).

Navarro, J.M.; Garcia-Olmos, B.; Andujar, S.; Rodríguez-Morán, M.; Moreno, M.; Porras, I. Effects of calcium on growth and nutritional state of citrus seedlings under NaCl stress. In *Proceedings of the 28th International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC)/International Symposium on Climwater—Horticultural Use of Water in a Changing Climate*, Lisbon, Portugal, 22–27 August 2010; Volume 922, pp. 55–60.

Navarro, J.M., García-Olmos, B., Andujar, S., Rodríguez-Morán, M., Moreno, M., Porras, I., (2011). Effects of calcium on growth and nutritional state of Citrus seedlings under NaCl stress. *Acta Horticulture*, 922, ISHS.

Navarro JM, Botía P and Pérez-Pérez JG, Influence of deficit irrigation timing on the fruit quality of grapefruit *Citrus paradisi* mac. *Food Chem* 175:329–336 (2015).

Navarro JM (1) (P), Robles, JM (1), Antolinos, V (1), Botía, P (1), Hernández FM (1), Olivares, L (1), Arques, E (1), Maestre-Valero, V (2), Martínez-Alvarez, V (2), Jodar, FJ (2), Acosta-Avilés, JA (2), Pérez-Pérez, JG (3), Riego de un cultivo de cítricos con agua marina desalinizada. Resultados preliminares en suelo y planta, (2020).

Nicolás, E., Pedrero, F., Alarcón, J. J., Mounzer, O., Martínez, V., Nortes, P. A., Alcón, F. J., Egea, G. y De Miguel. M. D., (2011). Estudio de la viabilidad de uso de las aguas regeneradas procedentes de la EDAR de Jumilla en la Comunidad de Regantes Miraflores. Murcia, Consejería de Agricultura y Agua Región de Murcia.

Nicolás, E., Alarcón, J.J., Mounzer, O., Pedrero, F., Nortes, P.A., Alcobendas, R., Romero-Trigueros C., Bayona, J.M. y Maestre-Valero, J.F., (2016). Long-term physiological and agronomic responses of mandarin trees to irrigation with saline reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 166: 1-8. (Corrigendum 169:193).

Nicolás E, Alarcón JJ, Mounzer O, Pedrero F, Nortes PA, Alcobendas Ret al., Long-term physiological and agronomic responses of mandarin trees to irrigation with saline reclaimed water. *AgricWaterManage*166:1–8 (2016).

Nicolás, E.; Romero-Trigueros, C.; Nortes, P.A.; Pedrero, F.; Bayona, J.M.; Maestre-Valero, J.F.; Alarcón, J.J. Chapter 7: Long-term physiological and agronomic responses of citrus irrigated with saline reclaimed water. In *Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, (2018); pp. 131–147. ISBN 978-0-12-813164-0.

Nikos V. Paranychianakis, Kostas S. Chartzoulakis, Andreas N. Angelakis, (2004). Influence of rootstock, irrigation level and recycled water on water relations and leaf gas exchange of Soultanina grapevines



Novick, K.A.; Ficklin, D.L.; Stoy, P.C.; Williams, C.A.; Bohrer, G.; Oishi, A.C.; Papuga, S.A.; Blanken, P.D.; Noormets, A.; Sulman, B.N.; et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nat. Clim. Change* (2016), 6, 1023–1087.

Novick, K.A.; Konings, A.G.; Gentine, P. Beyond soil water potential: An expanded view on isohydricity including land–atmosphere interactions and phenology. *Plant Cell Environ.* (2019), 42, 1802–1815.

North GB, Nobel PS (1996) Radial hydraulic conductivity of individual root tissues of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller as soil moisture varies. *Ann Bot* 77:133–142

North GB, Martre P, Nobel PS (2004) Aquaporins account for variations in hydraulic conductance for metabolically active root regions of *Agave deserti* in wet, dry, and rewetted soil. *Plant Cell Environ* 27:219–228

North GB, Nobel PS (2000) Heterogeneity in water availability alters cellular development and hydraulic conductivity along roots of a desert succulent. *Ann Bot* 85:247–255

Ocheltree, T.W.; Nippert, J.B.; Prasad, P.V.V. Stomatal sensitivity of C3 and C4 grasses. *Plant Cell Environ.* (2014), 37, 132–139.

Oded Sagee and Carol J. Lovatt. (1991). Putrescine Content Parallels Ammonia and Arginine Metabolism in Developing Flowers of the ‘Washington’ Navel Orange. Department of Botany and Plant Sciences, University of California, Riverside, CA 92521

Ohtake, H. y Tsuneda, S. Phosphorus Recovery and Recycling. Singapur, ed. Springer (2019). ISBN 978-981-10-8030-2.

ONU, (2015). World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Department of Economic and Social Affairs/Population Division 1, United Nations Organization (ONU).

ONU, (2017). World Population Prospects. The 2017 Revision Key Findings and Advance Tables. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. United Nations Organization (ONU). Working Paper No. ESA/P/WP/248.

ONU. World Population Prospects. The (2017) Revision Key Findings and Advance Tables. Department of Economic and Social Affairs, Population Division; Working Paper No. ESA/P/WP/248; United Nations Organization (ONU): New York, NY, USA, 2017.

ONU, (2022). World Population Prospects. United Nations Organization (ONU). [www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/](http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/)

ONU, (2023). World Population Prospects. United Nations Organization (ONU). [www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water](http://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water)

Oren, R.; Sperry, J.S.; Katul, G.G.; Pataki, D.E.; Ewers, B.E.; Phillips, N.; Schafer, K.V.R. Survey and synthesis of intra-and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant Cell Environ.* (1999), *22*, 1515–1526.

Parsons LR, Wheaton TA and Castle WS, High application rates of reclaimed water benefit Citrus tree growth and fruit production. *Hortscience* 36:1273–1277 (2001). <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.36.7.1273>.

Pantin, F.; Monnet, F.; Jannaud, D.; Costa, J.M.; Renaud, J.; Muller, B.; Simonneau, T.; Genty, B. The dual effect of abscisic acid on stomata. *New Phytol.* (2013), *97*, 65–72.

Papathanasiou, F., Papadopoulos, I., Tsakiris, I., Tamoutsidis, E. (2012). Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food, Agriculture & Environment*, *10*(2), 677-682.



Paranychianakis NV, Aggelides S, Angelakis AN, (2004). Influence of rootstock, irrigation level and recycled water on growth and yield of Sultamina grapevines. *Agric Water Manage* 69: 13-27.

Patakas, A.; Noitsakis, B. Cell wall elasticity as a mechanism to maintain favourable water relations during leaf ontogeny in grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* (1997), 48, 352-356.

Pedrero, F. y Alarcón, J.J., (2009). Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees. *Desalination*, 246: 631-639.

Pedrero, F., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Bayona, J.M., Nicolás, E., (2013). The viability of irrigating mandarin trees with saline reclaimed water in a semi-arid Mediterranean region: a preliminary assessment. *Irrigation Science*, 31: 759-768.

Pedrero, F., Maestre, J.F., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Nicolás, E., (2014). Physiological and agronomic mandarin trees performance under saline reclaimed water combined with regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 146: 228-237.

Pedrero, F., Maestre-Valero, J.F., Mounzer, O., Nortes, P.A., Alcobendas, R., Romero-Trigueros, C., Bayona, J.M., Alarcón, J.J. y Nicolás, E., (2015). Response of Young 'Star Ruby' grapefruit trees to regulated deficit irrigation with saline reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158: 51-60.

Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (2007), 11, 1633-1644.

Pérez-Pérez, J.G.; Syvertsen, J.P.; Botia, P.; Garcia-Sanchez, F. Leaf water relations and net gas exchange responses of salinized Carrizo citrange seedlings during drought stress and recovery. *Ann. Bot.* (2007), 100, 335-345.

Perez-Perez, J. G., Robles, J. M., & Botía, P. (2014). Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby' grapefruit trees in semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 133, 44e54.

Pérez-Pérez, J.G., García-Sánchez, F., Robles, J.M., Botía, P., (2015). 'Star Ruby' grapefruit and 'Clemenules' mandarin trees show different physiological and agronomic responses to irrigation with saline water. *Irrigation Science*, 33(3): 191-204. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-014-0459-8>.

Pereira, B.F.F.; Heb, Z.L.; Stoffella, P.; Melfic, A.J. Reclaimed wastewater: Effects on citrus nutrition. *Agric. Water Manag.* (2011), 98, 1828–1833.

Pérez-Arcoiza. A; Díaz-Espejo A; Fernandez-Torres R; Pérez-Romero L.F; Hernandez-Santana V. *Tree Physiology* 43, 277-287, (2022).

Pou, A.; Medrano, H.; Magdalena, T. Anisohydric behaviour in grapevines results in better performance under moderate water stress and recovery than isohydric behaviour. *Plant Soil* (2012), 359, 335–349.

Pou, A.; Diago, M.P.; Medrano, H.; Baluja, J.; Tardaguila, J. Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agric. Water Manag.* (2014), 134, 60–72.

Quarrie, S.A.; Whitford, P.N.; Appleford, N.E.J.; Wang, T.L.; Cook, S.K.; Henson, I.E.; Loveys, B.R. A monoclonal-antibody to(s)—Abscisic Acid—its characterization and use in a radioimmunoassay for measuring abscisic-acid in crude extracts of cereal and lupin leaves. *Planta* (1988), 173, 330–339.

Reynolds-Henne, C.E.; Langenegger, A.; Mani, J.; Schenk, N.; Zumsteg, A.; Feller, U. Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes. *Environ. Exp. Bot.* (2010), 68, 37–43.

Reboll V, Cerezo M, Roig A, Flors V, Lapena L and García-Agustín P, Influence of wastewater vs. groundwater on young Citrus trees. *J Sci Food Agric* 80:1441–1446 (2000).

Rengasamy, P., (2018). Irrigation water quality and soil structural stability: a perspective with some new insights. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050072>.



Rhodes M.J., The climateric and ripening of fruits, en: The biochemistry of fruits and their products Food science and technology 1: A series of monograph, Ed. A.C. Hulme, Academic Press London and New York (1971) 333-373.

Rodríguez-Domínguez, C.M.; Buckley, T.N.; Egea, G.; de Cires, A.; Hernández-Santana, V.; Martorell, S.; Díaz-Espejo, A. Most stomatal closure in woody species under moderate drought can be explained by stomatal responses to leaf turgor. *Plant Cell Environ.* (2016), 39, 2014–2026.

Rodríguez-Domínguez, C.M.; Hernández-Santana, V.; Buckley, T.N.; Fernández, J.E.; Díaz-Espejo, A. Sensitivity of olive leaf turgor to air vapour pressure deficit correlates with diurnal maximum stomatal conductance. *Agric. For. Meteorol.* (2019), 272–273, 156–165.

Rodríguez-Domínguez, C.M.; Brodribb, T.J. Declining root water transport drives stomatal closure in olive under moderate water stress. *New Phytol.* (2020), 225, 126–134.

Rodríguez-Gamir, J.; Intrigliolo, D.S.; Primo-Millo, E.; Forner-Giner, M.A. Relationships between xylem anatomy, root hydraulic conductivity, leaf/root ratio and transpiration rates in citrus trees on different rootstocks. *Physiol. Plant.* (2010), 139, 159–169.

Rodríguez-Gamir, J.; Ancillo, G.; Legaz, F.; Primo-Millo, E.; Forner-Giner, M.A. Influence of salinity on PIP gene expression in citrus roots and its relationship with root hydraulic conductance, transpiration and chloride exclusion from leaves. *Environ. Exp. Bot.* (2012), 78, 163–166.

Rodríguez-Gamir, J.; Xue, J.M.; Cleary, M.J.; Meason, D.F.; Clinton, P.W.; Domec, J.C. Aquaporin regulation in roots controls plant hydraulic conductance, stomatal conductance, and leaf water potential in *Pinus radiata* under water stress. *Plant Cell Environ.* (2019), 42, 717–729

Romero P, Navarro JM, Pérez-Pérez J, García-Sánchez F, Gómez-Gómez A, Porras I, Martínez V, Botía P (2006) Deficit irrigation and rootstock: their effects on water relations, vegetative development, yield, fruit quality and mineral nutrition of *Clemenules mandarin*. *Tree Physiol* 26:1537–1548

Romero-Trigueros, C., Nortes Tortosa, P.A., Pedrero Salcedo, F., Mounzer, O., Alarcón Cabañero, J.J., Bayona Gambín, J.M., Nicolás Nicolás, E., 2014a. Assessment of the viability of using saline reclaimed water in grapefruit in medium to long term. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4): 1137-1148. doi: 10.5424/sjar/2014124-5495

Romero-Trigueros, C., Nortes, P.A., Alarcón, J.J. y Nicolás, E., 2014b. Determination of <sup>15</sup>N stable isotope natural abundances for assessing the use of saline reclaimed water in grapefruit. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(10): 2525-2530.

Romero-Trigueros, C.; Nortes, P.A.; Alarcón, J.J.; Hunink, J.E.; Parra, M.; Contreras, S.; Nicolás, E. Effects of saline reclaimed waters and deficit irrigation on Citrus physiology assessed by UAV remote sensing. *Agric. Water Manag.* (2017), 183, 60–69.

Romero-Trigueros C, Parra M, Bayona Gambín JM, Nortes Tortosa P, Alarcon Cabañero JJ and Nicolás Nicolás E, Effect of deficit irrigation and reclaimed water on yield and quality of grapefruits at harvest and postharvest. 85 :405–411 (2017).

Romero-Trigueros, C.; Bayona, J.M.; Nortes, P.; Alarcón, J.J.; Nicolás, E. Determination of crop water stress index by thermometry in grapefruit trees irrigated with saline reclaimed water combined with deficit irrigation. *Remote Sens.* (2019), 11, 757.

Romero-Trigueros, C.; Alarcón, J.J.; Nortes, P.A.; Bayona, J.M.; Maestre-Valero, J.; Nicolás, E. Mid-long term effects of saline reclaimed water irrigation and regulated deficit irrigation on fruit quality of citrus. *J. Sci. Food Agric.* (2020), 100, 1350–1357.



Ruiz-Sánchez a, R. Domingo, A. Torrecillas, A. Pe´rez-Pastor, (2000). Water stress preconditioning to improve drought resistance in young apricot plants.

Saliendra, N.Z.; Sperry, J.S.; Comstock, J.P. Influence of leaf water status on stomatal response to humidity, hydraulic conductance, and soil drought in *Betula occidentalis*. *Planta* (1995), 196, 357–366.

Sampaio, A.H.R.; Silva, R.O.; Brito, R.B.F.; Soares, W.D.; Gesteira, A.D.; Souza, L.D.; Coelho, M.A. Sweet orange acclimatisation to water stress: A rootstock dependency. *Sci. Hortic.* (2021), 276, 109727.

Schacht, K., Marschner, B., (2015). Treated wastewater irrigation effects on soil hydraulic conductivity and aggregate stability of loamy soils in Israel. *J. Hydrol. Hydromech.* 63, 47–54.

Schultz, H.R. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of ATo field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant Cell Environ.* (2003), 26, 1393–1405.

Scholander, P.F.; Hammel, H.T.; Bradstreet, E.D.; Hemmingsen, E.A. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* (1965), 148, 339–346, doi:10.1126/science.148.3668.339.

Sepaskhah, A.R.; Kashefipour, S.M. Relationships between leaf water potential, CWSI, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation. *Agric. Water Manag.* (1994), 25, 13–22.

Sepaskhah, A.R.; Kashefipour, S.M. Evapotranspiration and crop coefficient of sweet lime under drip irrigation. *Agric. Water Manag.* (1995), 27, 331– 340.

Sepulcre-Cantó, G.; Zarco-Tejada, P.J.; Jiménez-Munóz, J.C.; Sobrino, J.A.; De Miguel, E.; Villalobos, F.J. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agric. For Meteorol.* (2006), 136, 31–44, doi: 10.1016/j.agrformet.2006.01.008.

Seymour, G. B.; Ostergaard, L.; Chapman, N. H.; Knapp, S. and Martin, C. (2013). Fruit development and ripening. *Ann. Rev. Plant Biol.* 64: 219-241.

Shackel, K.A.; Ahmadi, H.; Biasi, W.; Buchner, R.; Goldhamer, D.; Gurusinghe, S. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology* (1997), 7, 23-29.

Shang, Y.; Yang, D.; Ha, Y.; Lee, J.Y.; Kim, J.Y.; Oh, M.; Nam, K.H. Open stomata 1 exhibits dual serine/threonine and tyrosine kinase activity in regulating abscisic acid signaling. *J. Exp. Bot.* (2021), 72, 5494-5507.

Shirke, P.A.; Pathre, U.V. Influence of leaf-to-air vapour pressure deficit on the biochemistry and physiology of photosynthesis in *Prosopis juliflora*. *J. Exp. Bot.* (2004), 55, 2111-2120.

Sperry, J.S.; Hacke, U.G.; Oren, R.; Comstock, J.P. Water deficit and hydraulic limits to leaf water supply. *Plant Cell Environ.* (2002), 25, 251-263.

Storey, R. y Walker, R.R. (1999). Citrus and salinity. *Scientia Horticulturae*, 78: 39- 81.

Syvertsen, J.P.; Graham, J.H. Hydraulic conductivity of roots, mineral nutrition, and leaf gas exchange of Citrus rootstocks. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* (1985), 110, 865-869.

Syvertsen y Levy, (2005), Salinity interactions with other abiotic and biotic stresses in citrus.

Schultz, H.R. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant Cell Environ.* (2003), 26, 1393-1405.

Sumner ME, Boswell FC (1981) Alleviating nutrient stress. En: Arkin GF, Taylor HM (eds), *Modifying the root environment to reduce crop stress*. Amer Soc Agr Eng Monograph No. 4, St. Joseph, Mich, pp 99-137



Taiz L, Zeiger E. Plant physiology. 4th ed. Sunderland, Mass: Sinauer Associates; (2006). 764 p.

Tardieu, F.; Simonneau, T. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: Modelling isohydric and anisohydric behaviours. *J. Exp. Bot.* (1998), 49, 419–432.

Terrazas Rueda, J. M. (2018). Efecto de tres niveles de salinidad en el crecimiento del pasto agropiro variedad Alkar (*Thinopyrum ponticum*) mediante reproducción sexual y vegetativa. *Aphapi*, 4(3), 1295-1311. Obtenido de <http://ojs.agro.umsa.bo/index.php/ATP/articulo/view/261>

Testi, L.; Goldhamer, D.A.; Iniesta, F.; Salinas, M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrig. Sci.* (2008), 26, 395–405, doi:10.1007/s00271-008-0104-5.

Turner, N.C. Measurements of plant water status by pressure chamber technique. *Irrig. Sci.* (1988), 9, 289–308.

Turner, N.C., (1997). Further progress in crop water relations. *Advances in Agronomy*, 58:293-338.

UNECE, Standard Concerning the Marketing and Commercial Quality Control of Citrus Fruit. New York, NY; Geneva: UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, p. 12 (2010).

UNESCO, (2008). World Water Assessment Programme (WWAP). World Water Development (WD) Report (WWDR3), Water in a Changing World. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

UNESCO, (2017). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) Hechos y cifras. Hecho 1: La demografía y el consumo son los principales responsables de la presión ejercida sobre los recursos hídricos. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). <http://www.unesco.org/new/es/natural->

sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact1-demographics-consumption/).

UNESCO, (2017). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) Hechos y cifras. Hecho 1: La demografía y el consumo son los principales responsables de la presión ejercida sobre los recursos hídricos. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

UNESCO, (2017). World Water Assessment Programme (WWAP). World WaterDevelopment (WD) Report (WWDR3), Water in a Changing World. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

UNESCO, (2021). “El valor del agua”, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021. (UNESCO).

UN, (2020). Desafíos, oportunidades y acciones en un mundo de 7 mil millones news/documents/news/2011/7bpressrelease\_sp.pdf.

USDA, 2017. EU-28 Citrus Semi-annual (2017). Global Agricultural Information NeATork (GAIN). United States Department of Agriculture (USDA) and Foreign Agricultural Service.

Veste, M.; Ben-Gal, A.; Shani, U. Impact of thermal stress and high DPV on gas exchange and chlorophyll fluorescence of citrus grandis under desert conditions. Acta Hort. (2000), 531, 143–149.

Villalobos, F.J.; Testi, L.; Moreno-Perez, M.F. Evaporation and canopy conductance of citrus orchards. Agric. Water Manag. (2009), 96, 565–573.

Villalobos, F.J.; Testi, L.; Orgaz, F.; Garcia-Tejera, O.; Lopez-Bernal, A.; Gonzalez-Dugo, V.; Ballester-Lurbe, C.; Castel, J.R.; Alarcón-Cabañero, J.J.; Nicolás-Nicolás, E.; et al. Modelling canopy conductance and transpiration of fruit trees in Mediterranean areas: A simplified approach. Agric. For Meteorol. (2013), 171–172, 93–103.



Vivaldi, A.G.; Lopriore, G.; Romero-Trigueros, C.; Pedrero, F.; Camposeo, S.; Álvarez, S. Physiological responses of almond trees under regulated deficit irrigation using saline and desalinated reclaimed water. *Agric. Water Manag.* (2021).

Vogt, U.K. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. and *Sambucus nigra* L. *J. Exp. Bot.* (2001), 52, 1527–1536.

Wang, D.; Gartung, J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* (2010), 97, 1787–1794.

Xiong, D.L.; Flexas, J. From one side to ATo sides: The effects of stomatal distribution on photosynthesis. *New Phytol.* (2020), 228, 1754–1766.

Xueying Liang, Pichu Rengasamy, Ronald Smernik, Luke M. Mosley. (2021) Does the high potassium content in recycled winery wastewater used for irrigation pose risks to soil structural stability?

Yahmed, B.J.; Novillo, P.; Garcia-Lor, A.; Salvador, A.; Ben Mimoun, M.; Luro, F.; Talon, M.; Ollitrault, P.; Morillon, R. Salt tolerance traits revealed in mandarins (*Citrus reticulata* Blanco) are mainly related to root-to-shoot Cl translocation limitation and leaf detoxification processes. *Sci. Hortic.* (2015), 191, 90–100.

Yang, Y.J.; Bi, M.H.; Nie, Z.F.; Jiang, H.; Liu, X.D.; Fang, X.W.; Brodribb, T.J. Evolution of stomatal closure to optimize water-use efficiency in response to dehydration in ferns and seed plants. *New Phytol.* (2021), 230, 2001–2010.

Zaragoza et al., (2011) Origen especies comerciales de cítricos. C: cidro, NA: naranjo amargo, L: limonero, LM: limerero, P: pomelo, ND: naranjo dulce, M: mandarino.

Zarco-Tejada, P.J.; Gonzalez-Dugo, V.; Berni, J.A.J. Fluorescence, temperature and narrowband indices acquired from a UAV platform for water stress detection

using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sens. Environ.* (2012), 117, 322–337.

Zekri, M.; Parsons, L.R. Growth and root hydraulic conductivity of several citrus rootstocks under salt and polyethylene glycol stresses. *Physiol. Plant* (1989), 77, 99–106.

Zhang, Y.J.; Meinzer, F.C.; Qi, J.H.; Goldstein, G.; Cao, K.F. Midday stomatal conductance is more related to stem rather than leaf water status in subtropical deciduous and evergreen broadleaf trees. *Plant Cell Environ.* 2013, 36, 149–158.

Zhou Y, He W, Zheng W, Tan Q and Hu C, Fruit sugar and organic acid were significantly related to fruitmgof six citrus cultivars. *FoodChem* 259:278–285 (2018).

# **CAPÍTULO VII.**

## **NOMENCLATURA**





## **NOMENCLATURA**

### **Acrónimos**

ANOVA: Análisis de la varianza (ANalysis Of VAriance)

AR: Agua Regenerada

AT: Agua del Traspase

BOE: Boletín Oficial del Estado

C: Control

CARM: Comunidad Autónoma de la Región de Murcia

CE: Conductividad eléctrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

DOY: Día Del Año

DV: Dosel vegetal ( $\text{m}^3$ )

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

EEA: Agencia Europea de Medioambiente (Environmental European Agency)

ESAMUR: Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

FAOSTAT: Base de datos estadísticos de alimentación y agricultura de la ONU

FEPEX: Federación Española de Asociaciones de Productores Exportadores de Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas vivas

FG: Etapa fenológica de crecimiento del fruto (Fruit Growth)

GAIN: Red mundial de información agrícola (Global Agricultural Information NeATork)

USDA: Departamento de agricultura de USA (United Stated Department of Agriculture)

FAS: Servicio extranjero de agricultura (Foreign Agricultural Service)

GMT: Tiempo medio de Greenwich (Greenwich Mean Time)

HSD: Diferencia significativa honesta (Honest Significant Difference)

ICP: Plasma acoplado inductivamente (Inductively Coupled Plasma)

INE: Instituto Nacional de Estadística

LED: Diodo emisor de luz (Light-Emitting Diode)

MAGRAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

MAPAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

NIR: banda espectral del infrarrojo cercano entre 700-900 nm (Near Infrared Region)

ONU: Organización de Naciones Unidas (United Nations Organization)

PHDS: Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura

RDC: Riego Deficitario Controlado

RS: Teledetección (Remote Sensing)

UE: Unión Europea

UK: Reino Unido (United Kingdom)

USA: Estados Unidos de América (United States of America)

### **English acronyms**

C: Control

DOY: Day of Year

AR: Reclaimed Water

RDC: Regulated Déficit Irrigation

TSS: Total Soluble Solids (°Brix)

AT: Transfer Water

WWTP: Waste Water Treatment Plant

### **Magnitudes y parámetros**

DPV: Déficit de Presión de Vapor (kPa)

ET: Evapotranspiración (mm·día<sup>-1</sup>)

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo (mm·día<sup>-1</sup>)

ET<sub>0</sub>: Evapotranspiración de referencia (mm·día<sup>-1</sup>)

g<sub>s</sub>: Conductancia estomática (μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> o mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)

IM: Índice de Madurez (adimensional)

K<sub>c</sub>: Coeficiente de cultivo (adimensional)

PA: Productividad del Agua (kg·m<sup>-3</sup>)

SST: Sólidos Solubles Totales (°Brix)

STD: Sólidos Totales Disueltos (mg·L<sup>-1</sup>)

TA: Acidez Titulable (%)

Ψ<sub>s</sub>: Potencial de tallo (MPa)

Ψ<sub>π</sub>: Potencial osmótico (MPa)

Ψ<sub>p</sub>: Potencial de presión (MPa)

# **CAPÍTULO VIII.**

## **ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS**



## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS PREÁMBULO

**Figura P.1** Diagrama de precipitaciones de la Región de Murcia en el período comprendido entre 2011-2021. Fuente: Propia .....2

**Figura P.2** Diagrama de producción de cultivos leñosos en miles de toneladas en el período comprendido entre 2014-2020. Fuente: CARM, 2020 .....3



## FIGURAS CAPÍTULO II

<b>Figura II. 11</b> Consumo de agua a nivel mundial. Fuente: Water Foot print, 2020 .....	17
<b>Figura II.12</b> Ubicación geográfica de Estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Fuente: CEDEX, 2018 .....	21
<b>Figura II.13</b> Histórico volumen agua depurada en la Región de Murcia (h <sup>3</sup> /año). Fuente: ESAMUR (2022).....	22
<b>Figura II.14</b> Distribución de la superficie de cultivo de regadío. Fuente: CARM, 2020.....	23
<b>Figura II.15</b> Fertilizantes de Estruvita a partir de materias primas secundarias. Fuente: triman.net .....	25
<b>Figura II.6</b> Efectos toxicidad de boro en cítricos: A (Limonero); B (Naranja); C (Pomelo). .....	28
<b>Figura II.7</b> Acumulación de sales en la zona del bulbo húmedo. ....	29
<b>Figura II.8</b> Origen especies comerciales de cítricos. C: cidro, NA: naranja amargo, L: limonero, LM: limero, P: pomelo, ND: naranja dulce, M: mandarina. Fuente: Zaragoza et al., 2011. ....	33
<b>Figura II.9</b> Producción mundial de pomelo por países. Fuente: FAO, 2019.....	34
<b>Figura II.10</b> Principales zonas de producción cítrica en la Región de Murcia .....	35
<b>Figura II.161</b> Imagen Pomelo Star Ruby. Fuente .....	36
<b>Figura II.172</b> Principales zonas de cultivo de pomelo .....	38
<b>Figura II.183</b> Imagen del fruto de la mandarina variedad “Orogrande” . ....	40
<b>Figura II.194</b> Principales zonas de mandarina. ....	41
<b>Figura II.15</b> Relaciones hídricas de la planta.....	43
<b>Figura II.16</b> Apertura y cierre de estomas.....	44
<b>Figura II.17</b> Medidor portátil de fotosíntesis y otras variables fisiológicas como conductividad estomática y transpiración .....	45
<b>Figura II.18</b> Cambios en el contenido de ABA en respuesta al estrés hídrico (2020). .....	48
<b>Figura II.19</b> Comportamiento agronómico de patrones fresa a condiciones de salinidad .....	49

### FIGURAS CAPÍTULO III

<b>Figura III.1</b> Ubicación de la finca experimental en Campotéjar-Murcia. Fuente: Adaptada de Google .....	57
<b>Figura III.2</b> Finca experimental “Lo Montero”: (1) Parcela de mandarinos, (2) EDAR del norte de Molina de Segura, (3) Trasvase Tajo-Segura y (4) Parcela de Pomelos. Fuente: Adaptada de Google Maps.....	58
<b>Figura III.3</b> Cultivo del pomelo. Fuente: Propia .....	59
<b>Figura III.4</b> Parcela mandarina. Fuente: Propia .....	59
<b>Figura III.5</b> Trasvase Tajo-Segura. Fuente: Propia (2023).....	60
<b>Figura III.6</b> EDAR Molina norte. Fuente: ESAMUR (2023).....	60
<b>Figura III.7</b> Esquema tratamientos del ensayo. Fuente: Propia .....	61
<b>Figura III.8</b> Equipos para la evaluación de la calidad del agua: a) medidor de oxígeno disuelto, b) pH-metro, c) turbidímetro y d) equipo multi-rango, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (SDT). Fuente: Romero-Trigueros, (2018).....	62
<b>Figura III.9</b> Equipo de espectrometría de emisión con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-iCAP 6500 Duo Thermo y Cromatógrafo iónico Metrohm.Fuente: sstti.ua.es .....	63
<b>Figura III.10</b> Sensor termometría marca Agogee. Fuente: Apogee instrumens	64
<b>Figura III.11</b> Cámara de luz LED (6400) del equipo de fotosíntesis portátil LI-6400. Fuente: Propia .....	65
<b>Figura III.12</b> Equipo de fotosíntesis portátil LI-6400 Licor. Fuente: Propia .....	65
<b>Figura III.13</b> Cámara de presión modelo 3000 Soil Moisture Equipment Corp. Fuente: Propia.....	66
<b>Figura III.14</b> Funcionamiento de la Cámara de presión. Fuente: Slide.com.....	66
<b>Figura III.15</b> Muestreo de suelo. Fuente: Propia.....	67
<b>Figura III.16</b> Índice RAS y CROSS. Fuente: Propia.....	68
<b>Figura III.17</b> Balanza marca KERN para determinación de pesos de los frutos. Fuente: Femto.es.....	72



<b>Figura III.18</b>	Penetrómetro marca AGROSTA. Fuente: propia.....	73
<b>Figura III.19</b>	Refractómetro digital ATAGO. Fuente: Propia.....	73
<b>Figura III.200</b>	Colorímetro Minolta CR-410. Fuente: Minolta.es .....	74

## FIGURAS CAPÍTULO IV

**Figura IV.1 (A)** Evolución estacional de la precipitación ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ), CT y RDC ( $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ), evapotranspiración de referencia ( $\text{ET}_0$ ,  $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ ) y déficit de presión de vapor (DPV,  $\text{kPa}\cdot\text{mes}^{-1}$ ) durante 2017. **(B)** Media diaria de DPV y radiación solar ( $R_s$ ,  $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ ) durante el periodo experimental (de DOY 193 a 257 del año 2017). Las líneas verticales discontinuas dividen el periodo experimental en tres periodos con diferente nivel de estrés hídrico: Periodo 1 (P1, DOY 193-212), Periodo 2 (P2, DOY 213-239) y Periodo 3 (P3, DOY 240-257) ..... 88

**Figura IV.2** Patrones representativos del curso diurno de la temperatura del dosel,  $T_c$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y evolución de la radiación solar,  $R_s$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (columna A) y patrones representativos del curso diurno de  $T_c-T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y evolución de DPV (kPa) (columna B) para cada tratamiento: AT-CT (control agua de trasvase), AT-RDC (riego deficitario controlado agua de trasvase), AR-CT (control agua regenerada) y AR-RDC (riego deficitario controlado agua regenerada) en tres días que diferían en el estado hídrico del árbol: DOY 193, 224 y 257 en 2017. Cada lectura de  $T_c$  correspondió al valor medio de cuatro árboles del mismo tratamiento..... 90

**Figura IV.3** Ejemplo de relación entre  $T_c-T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y DPV (kPa), utilizando lecturas de 15 minutos y promedios de 60 minutos obtenidas a las 8.00 GMT para árboles de riego completo (AT-CT) durante el periodo experimental en 2017. La línea continua y la línea discontinua corresponden a regresiones lineales para lecturas de 15 minutos y para promedios de 60 minutos, respectivamente ..... 93

**Figura IV.4** Variación estacional de las líneas de base sin estrés hídrico (NWSB). Relaciones entre  $T_c-T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y DPV (kPa) con datos del periodo experimental (DOY 193-257) a las 09.00 GMT (A) y datos divididos en tres periodos diferentes: 1 (P1, DOY 193-212), 2 (P2, DOY 213-239) y 3 (P3, DOY 240-257). En los cálculos sólo se utilizaron los días despejados y no lluviosos. Las regresiones lineales se muestran en las tablas IV.2 y IV.3. La línea continua, la línea de guiones largos y la línea de puntos corresponden a las regresiones lineales para P1, P2 y P3, respectivamente..... 98



**Figura IV.5** Variación horaria de las líneas de base sin estrés hídrico (NWSBs). Relaciones entre  $T_c - T_a$  ( $^{\circ}C$ ) y DPV (kPa) con datos de árboles totalmente regados (AT-CT) en el Periodo 3 (P3, DOY 240-257) de 08.00-17.00 GMT. En los cálculos sólo se utilizaron días de cielo despejado y no lluviosos. Las regresiones lineales se muestran en la Tabla 3 ..... 99

**Figura IV.6** Mejor ajuste a la pendiente NWSB para los tres periodos: 1 (P1, DOY 193-212), 2 (P2, DOY 213-239) y 3 (P3, DOY 240-257) ..... 99

**Figura IV.7** Relaciones del ángulo solar cenital ( $\theta Z$ ) con (A) los interceptos NWSB y (B) las pendientes NWSB para los tres periodos diferentes: 1 (P1, DOY 193-212), 2 (P2, DOY 213-239) y 3 (P3, DOY 240-257) ..... 100

**Figura IV.8** Evolución de (A) la temperatura del dosel ( $T_c$ ,  $^{\circ}C$ ) y (B) la diferencia entre  $T_c - T_a$  ( $T_c - T_a$ ,  $^{\circ}C$ ) para cada tratamiento: AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC durante el periodo experimental. Cada valor es la media de cuatro mediciones individuales por árbol y repetición. \* Indica diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ). Las líneas verticales discontinuas dividen el periodo experimental en tres periodos con diferente nivel de estrés hídrico: 1 (DOY 193-212), 2 (DOY 213-239) y 3 (DOY 240-257) ..... 102

**Figura IV.9** Evolución de (A) el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) recogido a las 10.00 GMT y (B) el potencial hídrico del tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ , MPa) para cada tratamiento: AT-CT, AT-RDC, AR-CT y AR-RDC durante el periodo experimental. Cada valor es la media de cuatro mediciones individuales por árbol y repetición. \* Indica diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $P < 0,05$ ). Las líneas verticales discontinuas dividen el periodo experimental en tres periodos con diferente nivel de estrés hídrico: 1 (DOY 193-212), 2 (DOY 213-239) y 3 (DOY 240-257) ..... 103

**Figura IV.10** Evolución diaria del potencial hídrico foliar ( $\Psi_1$ ) (A, B) y de la conductancia estomática ( $g_s$ ) (C, D) para cada tratamiento (AT-CT): agua de trasvase riego completo; AT-nI: agua de trasvase sin riego; AR-fl: agua

regenerada regada completamente; AR-nI: agua regenerada no regada) y cultivo (pomelo y mandarina). Cada punto es la desviación estándar media de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Diferentes letras indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según el test de Tukey.....123

**Figura IV.11** Potencial de turgencia de la hoja ( $\Psi_p$ ) (A, C) y potencial osmótico de la hoja ( $\Psi_\pi$ ) (B, D) antes del amanecer y mediodía para cada tratamiento (AT-CT: agua de trasvase-riego completo; AT-nI: agua de trasvase sin riego; AR-CT: agua regenerada-regada completamente; AR-nI: agua regenerada sin riego) y cultivo (pomelo y mandarina). Cada valor es la media de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Las barras denotan la desviación estándar de la media. Dentro de cada muestreo y cultivo, las letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según la prueba de Tukey. Los asteriscos indican diferencias significativas diferencias entre muestreos temporales para el mismo tratamiento según el ANOVA de medidas repetidas (\*\*\*)  $p < 0,001$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*  $p < 0,05$ ) .....125

**Figura IV.12** Contenido de ABA en las hojas de pomelo (A) y mandarina (B) y para cada tratamiento (AT-CT: transferencia de agua de trasvase; AT-nI: agua de transferencia-no regada; AR-CT: agua regenerada-regada; AR-nI: agua regenerada-no regada). Cada valor es la media de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Las barras indican las desviaciones estándar de la media. Dentro de cada muestreo y cultivo, letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , evaluadas mediante el test de Tukey .....128

**Figura IV.13** Correlaciones entre la conductancia estomática del mediodía ( $g_s$  del mediodía) y los valores del potencial hídrico del suelo ( $\Psi_{\text{suelo}}$ ) (A, B) y entre la conductancia estomática ( $g_s$ ) y los valores de déficit de presión de vapor (DPV) (C, D) para cada tratamiento (AT-CT : agua de trasvase-riego completo; AT-nI : agua de trasvase-no riego; AR-CT : agua regenerada-regada completamente; AR-nI : agua regenerada-no regada) y cultivo (pomelo y mandarina). Cada punto es la media de los dos árboles centrales de cada bloque. Las líneas de regresión entre  $g_s$  y DPV para las plantas de pomelo fueron (C): AT-CT :  $g_s = 0,100 \text{ DPV} + 0,170$ ;  $r^2$



= 0,53 \*\*\*( $p < 0,001$ ); AT-nI :  $g_s = 0,049 DPV + 0,223$ ;  $r^2 = 0,61$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-CT :  $g_s = 0,054 DPV + 0,193$   $r^2 = 0,69$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-nI :  $g_s = 0,026 DPV + 0,132$ ;  $r^2 = 0,52$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ). Las líneas de regresión entre  $g_s$  y DPV para las plantas de mandarina fueron (D): AT-CT :  $g_s = 0,033 DPV + 0,170$ ;  $r^2 = 0,48$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AT-nI :  $g_s = 0,014 DPV + 0,062$ ;  $r^2 = 0,55$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-CT :  $g_s = 0,025 DPV + 0,152$   $r^2 = 0,42$  \*\*\* ( $p < 0,001$ ); AR-nI :  $g_s = 0,019 DPV + 0,088$ ;  $r^2 = 0,39$  \*\*\* ( $p < 0,001$ )..... 130

**Figura IV.14** Correlaciones entre los valores de conductancia estomática ( $g_s$ ) y potencial hídrico foliar ( $\Psi_1$ ) para pomelo (A) y mandarina (B) y todos los tratamientos. Cada punto es la media de los dos árboles centrales de cada bloque ..... 131

**Figura IV.15** Correlaciones del potencial hídrico foliar de mediodía ( $\Psi_1$  de mediodía) con la conductancia estomática de mediodía ( $g_s$  de mediodía) (líneas continuas), del gradiente de potencial hídrico hidrodinámico (inducido por la transpiración) de mediodía desde las raíces a los brotes (mediodía  $\Delta\Psi_{Planta}$ ) con  $g_s$  de mediodía (líneas discontinuas) (A,B), y de  $\Psi_1$  de mediodía con el potencial hídrico del suelo ( $\Psi_{suelo}$ ) (líneas continuas) y de  $\Delta\Psi_{Planta}$  con  $\Psi_{suelo}$  (líneas discontinuas) (C,D) para todos los tratamientos y ambos cultivos (pomelo y mandarina)..... 132

**Figura IV.16** Correlaciones entre la conductancia estomática del mediodía ( $g_s$  del mediodía) y (A) la conductancia hidráulica del tallo de la raíz ( $K_{raiz}$ ) y (B) la conductancia hidráulica del dosel ( $K_{dosel}$ ) para cada tratamiento (AT-CT: transferencia de agua-regado completamente; AT-nI: agua de transferencia-no regada; AR-CT: agua regenerada-regada; AR-nI: agua regenerada-no regada) y cultivo (pomelo y mandarina)..... 133

**Figura IV.17** Peso del fruto (g) y Espesor de corteza (EC, mm) de mandarinos en el periodo 2008-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: riego con agua de trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado con agua trasvase, AR-CT: riego

con agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario regulado con agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Dentro de cada año, letras diferentes indican diferencias entre tratamientos mediante el análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). ns significa que los tratamientos no son significativamente diferentes según test de Tukey ( $P < 0,05$ ) .....150

**Figura IV.18** Índice de madurez (IM) de los frutos de mandarino y pomelo en el periodo 2008-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: riego con agua de trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado agua trasvase, AR-CT: riego agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Dentro de cada año, letras diferentes indican diferencias entre tratamientos mediante el análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). ns significa que los tratamientos no son significativamente diferentes según test de Tukey ( $P < 0,05$ ).....151

**Figura IV.19** Peso del fruto (g) y Espesor de corteza (EC, mm) de los pomelos en el periodo 2008-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: riego con agua de trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado agua trasvase, AR-CT: riego con agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado con agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por bloque). Dentro de cada año, letras diferentes indican diferencias entre tratamientos mediante el análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). ns significa que los tratamientos no son significativamente diferentes según test de Tukey ( $P < 0,05$ ).....153

**Figura IV.20** Concentración de sodio (Na; %), cloro (Cl; %) y boro (B; ppm) en mandarino para los distintos tratamientos regados con AT y AR. Para cada año los valores corresponden al valor medio del periodo comprendido entre junio y septiembre ( $n=4$ ). Cada histograma representa la media de ocho árboles  $\pm$  es. Las barras sobre el histograma indican las diferencias estadísticas entre los diferentes tratamientos de acuerdo con ANOVA ( $p \leq 0.05$ ) y test Tuckey HSD ( $P < 0.05$ ) .....175



**Figura IV.21** Concentración de sodio (Na; %), cloro (Cl; %) y boro (B; ppm) en pomelo para los distintos tratamientos regados con AT y AR. Para cada año los valores corresponden al valor medio del periodo comprendido entre junio y septiembre (n=4). Cada histograma representa la media de ocho árboles  $\pm$  ES. Las barras sobre el histograma indican las diferencias estadísticas entre los diferentes tratamientos de acuerdo con ANOVA ( $p \leq 0.05$ ) y test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ )

..... 198

---

## TABLAS CAPÍTULO II

<b>Tabla II.1</b> Características principales de los patrones Citrus Macrophylla y Citrange Carrizo. Fuente: Romero-Trigueros, 2018.....	41
--	----



### **TABLAS CAPÍTULO III**

**Tabla III.1** Relación de calibres comerciales de pomelo según los estándares de la unión europea. Fuente: Aprifel, 2020. .... 71

**Tabla III.2** Relación de calibres comerciales de mandarina según la unión europea. Fuente: Reglamento (CE) n° 1799/2001 ..... 71

## TABLAS CAPÍTULO IV

**Tabla IV.1** Propiedades físico-químicas del agua del trasvase Tajo-Segura y del agua regenerada en 2017. Los valores son medias  $\pm$  DE de 12 muestras individuales tomadas a lo largo del ciclo de cultivo. CE: conductividad eléctrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ); AT: agua de trasvase; AR: agua regenerada..... 83

**Tabla IV.2** Correlaciones horarias significativas entre  $T_c-T_a$  y DPV utilizando los días del año sin nubes (DOY) 193-257 para la línea de base sin estrés hídrico (NSWB). GMT: hora media de Greenwich. DPV: déficit de presión de vapor.  $\theta Z$ : ángulo solar cenital. El sufijo  $_{av}$  indica la media. Cada valor se obtiene a partir de la media horaria de  $T_c-T_a$  y DPV en un día y una hora determinados, utilizando la  $T_c$  de los árboles regados completamente (AT-CT). El número de puntos para cada regresión fue de 53. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre horas (GMT) según ANCOVA ( $P<0,01$ ) ..... 94

**Tabla IV.3** Correlaciones horarias entre  $T_c-T_a$  frente al DPV para establecer líneas de base sin estrés hídrico (NSWB) utilizando días sin nubes para diferentes periodos estacionales: Periodo 1 (P1, DOY 193 a 212); Periodo 2 (P2, DOY 213 a 239) y periodo 3 (P3, DOY 240 a 257). GMT: hora media de Greenwich. DPV: Déficit de presión de vapor.  $R_s$ : Radiación solar. El sufijo  $_{av}$  indica la media. Cada valor se obtiene a partir de la media horaria de  $T_c-T_a$  y DPV en una hora dada de un día dado de cada periodo, utilizando la  $T_c$  de los árboles totalmente regados (AT-CT). El número de puntos para cada regresión fue de 19, 19 y 15 para P1, P2 y P3, respectivamente. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre Tiempos (GMT) según ANCOVA ( $P<0.01$ ) ..... 95

**Tabla IV.4** Coeficientes de correlación (R) para la regresión lineal, pendiente (a) e intercepto (b) encontrados entre el potencial hídrico del tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ) frente a la temperatura del dosel ( $T_c$ ), la diferencia entre la temperatura del dosel y la del aire ( $T_c-T_a$ ) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) y el CWSI frente a  $T_c-T_a$  de los pomelos, independientemente de los tratamientos de riego, durante el



periodo de RDI (de DOY 193 a 257). N=20 (valor medio de cada tratamiento y 5 días).....106

**Tabla IV.5** Potencial osmótico foliar a plena turgencia ( $Y_{100s}$ ) al mediodía, ajuste osmótico (OA) y valores de elementos fitotóxicos foliares para cada tratamiento y cultivo (pomelo y mandarino). Cada valor es la desviación estándar media de 4 bloques recogidos a 248 DOY. Dentro de cada columna, las letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según la prueba de Tukey. AT-CT : agua de trasvase regado completamente; AT-nI : agua de trasvase sin riego; AR-CT : agua regenerada-regado completamente; AR-nI : agua regenerada-no regada .....126

**Tabla IV.6** Conductancia hidráulica del tallo de la raíz (Kraiz) y conductancia hidráulica del dosel (Kdosel) para cada tratamiento y cultivo (pomelo y mandarino). Cada valor es la media de la desviación estándar de 4 bloques, recogidos en 248 DOY. Dentro de cada columna, las letras diferentes indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ , según la prueba de Tukey. En el ANOVA de dos vías, incluyendo la calidad del agua ( $Q_w$ ) y cantidad ( $A_w$ ) como factores, \*\*\*  $p < 0,001$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*  $p < 0,05$ ; ns: no significativo. AT-CT : Agua de trasvase-regada completamente; AT-nI : Agua de trasvase-no regada; AR-CT : Agua regenerada-regada completamente; AR-nI : agua regenerada; AR-nI : agua regenerada-no regada .....127

**Tabla IV.7** Valores anuales de agua aplicada ( $mm \cdot año^{-1}$ ) y ahorro de agua (%) para el periodo medio-plazo (2008-2011), largo-plazo (2012-2015) y periodo completo estudio (2008-2015) para cada tratamiento de agua (CT, tratamiento control; RDC, riego deficitario controlado).....146

**Tabla IV.8** Análisis químico del agua de riego (conductividad eléctrica;  $CE_a$ , relación de absorción de sodio;  $RAS_a$ , pH, cationes,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^+$  y aniones,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$  y  $SO_4^{2-}$ ) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR) para el periodo 2008–2015. Valores medios para los 6 años, con  $n = 72$  (cada año  $n=12$ ) .....148

**Tabla IV.9** Contenido de sólidos solubles (CSS, °Brix) y ácido tritatable ( $A_T$ , %) en el periodo intermedio 2008-2011 en los cuatro tratamientos (AT-CT: control agua trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado con agua de trasvase, AR-CT: control agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado con agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por repetición). Dentro de cada año, letras distintas indican diferencias entre tratamientos mediante análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) ..... 154

**Tabla IV.10** Contenido de sólidos solubles (CSS, °Brix) y ácido tritatable ( $A_T$ , %) en el periodo largo plazo 2012-2015 en los cuatro tratamientos (AT-CT: control agua trasvase, AT-RDC: riego deficitario controlado con agua de trasvase, AR-CT: control agua regenerada, AR-RDC: riego deficitario controlado con agua regenerada). Cada valor es la media  $\pm$  SE de las mediciones realizadas en 100 frutos por tratamiento (25 frutos por repetición). Dentro de cada año, letras distintas indican diferencias entre tratamientos mediante análisis ANOVA seguido de test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) ..... 155

**Tabla IV.11** Análisis físico-químico del agua de riego (conductividad eléctrica;  $CE_a$ , relación de absorción de socio; RAS, pH, cationes,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  y aniones,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{--}$  y  $SO_4^-$ ) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR) para el periodo 2013-2018. Valores medios  $\pm$  SE para los 6 años, con  $n = 72$  (cada año  $n=12$ ). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ) ..... 165

**Tabla IV.12** Valores medios anuales y valores medios del periodo (2013 a 2018); periodo medio-plazo (2013-2015) y largo plazo (2016-2018) de temperatura ( $T$ , °C), precipitación ( $P$ , mm), evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ , mm), volumen de agua aplicado ( $R$ , mm año<sup>-1</sup>) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR) ..... 166



**Tabla IV.13** Conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada del suelo ( $EC_s$ ,  $dS\ m^{-1}$ ), relación de absorción de sodio ( $RAS_s$ ) y relación de cationes de la estabilidad estructural del suelo ( $CROSS_s$ ) para cada año (desde 2013 hasta 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Los valores son medias  $\pm$  SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Tukey's HSD test ( $P < 0.05$ ).....169

**Tabla IV.14** Parámetros de fotosíntesis  $[A]$  ( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ) ( $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) y eficiencia del uso del agua (EUA) ( $\mu mol \cdot mol^{-1}$ ) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018) y periodo completo (2013-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media  $\pm$  SE de ocho árboles (dos árboles por repetición). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).....173

**Tabla IV.15** Volumen del dosel (VD;  $m^3$ ), cosecha (PT;  $Kg\ árbol^{-1}$ ), cosecha/dosel (PT/VD;  $kg\ m^{-3}$ ), carga de frutos (CF;  $frutos\ árbol^{-1}$ ), peso de fruto (PF; g), y productividad del agua (PA;  $kg\ m^{-3}$ ) para cada año (de 2013 a 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Los valores son medias  $\pm$  SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).....179

**Tabla IV.16** Parámetros de calidad de fruto: Diámetro (cm), Espesor de corteza (EC, mm), Contenido de zumo (Z, %), Contenido sólidos solubles (CSS, °Brix), Acidez titulable ( $A_T$ , %) e índice de madurez (IM, CSS/ $A_T$  ratio) para cada año (desde 2013 hasta 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media  $\pm$  SE de la medida de 100 frutos por tratamiento. (25 por repetición). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).....182

**Tabla IV.17** Análisis físico-químico del agua de riego (conductividad eléctrica;  $CE_a$ , relación de absorción de sodio; RAS, pH, cationes,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^+$  y aniones,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{--}$  y  $SO_4^-$ ) de agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR) para el periodo 2013–2018. Valores medios  $\pm$  SE para los 6 años, con  $n = 72$  (cada año  $n=12$ ). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ )..... 189

**Tabla IV.18** Temperatura (T, °C), precipitación (P, mm), evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ , mm), volumen de agua aplicada (R, mm año<sup>-1</sup>) para cada año (de 2013 a 2018) y valores medios para los periodos a medio (2013-2015), a largo plazo (2016-2018) y la media de todo el ensayo experimental (2013-2018). ..... 190

**Tabla IV.19** Conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada del suelo ( $CE_s$ , dS m<sup>-1</sup>), relación de absorción de sodio (RAS<sub>s</sub>) y relación de cationes de la estabilidad estructural del suelo (CROSS<sub>s</sub>) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018) en invierno (febrero) y al final del verano (septiembre). Los valores son medias  $\pm$  SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ) ..... 193

**Tabla IV.20** Parámetros de fotosíntesis [ $A$ ] ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ) ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y eficiencia del uso del agua (EUA) ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018) y periodo completo (2013-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media  $\pm$  SE de ocho árboles, dos árboles por repetición. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ )..... 196

**Tabla IV.21** Valores de volumen del dosel (VD; m<sup>3</sup>), cosecha (PT; Kg árbol<sup>-1</sup>), cosecha/dosel (PT/VD; kg m<sup>-3</sup>), carga de frutos (CF; frutos árbol<sup>-1</sup>), peso de fruto (PF; g), y productividad del agua (PA; kg m<sup>-3</sup>) para cada año (de 2013 a 2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo



(2016-2018). Los valores son medias  $\pm$  SE de ocho árboles por tratamiento. Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD ( $P < 0.05$ ).....202

**Tabla IV.22** Parámetros de calidad de fruto: Diámetro (D; cm), espesor de corteza (EC; mm), contenido de zumo (CZ; %), sólidos solubles (CSS; °Brix), acidez titulable ( $A_T$ ; %) e índice de madurez (IM; CSS/ $A_T$  ratio) para cada año (2013-2018) y media de los valores para los periodos medio-plazo (2013-2015) y largo-plazo (2016-2018). Para cada año, el valor corresponde a la media  $\pm$  SE de 100 frutos por tratamiento (25 frutos por repetición). Las diferentes letras indican las diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con el test de Tukey HSD test ( $P < 0.05$ ) .....204