

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de  
Biosistemas



**Respuestas fisiológicas y productivas en  
árboles de pistacho de la variedad  
Kerman. Efectos del patrón y el estrés  
hídrico.**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Eduardo Fernández Suela**

Ingeniero Agrónomo

Madrid, 2023



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica,  
Alimentaria y Biosistemas

**Doctorado en Tecnología Agroambiental para una Agricultura  
Sostenible**

**Respuestas fisiológicas y productivas de  
árboles de pistacho de la variedad  
Kerman. Efecto del patrón y el estrés  
hídrico**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Eduardo Fernández Suela**

Ingeniero Agrónomo

Bajo la dirección de:

Dr. Jesús Alegre Álvaro

Dra. Ana Centeno Muñoz

Madrid, 2023

Título: Respuestas fisiológicas y productivas de árboles de pistacho de la variedad Kerman. Efectos del patrón y el estrés hídrico

Autor: Eduardo Fernández Suela

Programa de Doctorado: Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible

Dirección de tesis:

Dr. Jesús Alegre Álvaro. Investigador. Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (Director)

Dra. Ana Centeno Muñoz. Profesora departamento Producción Agraria. Universidad Politécnica de Madrid. (CoDirectora)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de un contrato predoctoral (BES-2017-082165), financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por FSE invierte en tu futuro. Además, recibió financiación del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), a través del proyecto PDR18-IMPLANTAVERA, “El pistachero en la Comunidad de Madrid: desarrollando una estrategia de implantación de un cultivo alternativo, rentable y respetuoso con el Medio Ambiente” en el contexto del Programa de Desarrollo Rural de la Comunidad de Madrid 2014-2020.





# Agradecimientos

A mis directores de tesis, Dr. Jesús Alegre y Dra. Ana Centeno, por su apoyo a lo largo de todo el proceso.

Me gustaría dar las gracias al Ministerio de Ciencia e Innovación por brindarme el apoyo económico para realizar este trabajo.

Agradecer también la participación del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario por el apoyo económico recibido.

Muchas gracias al personal de la universidad, en especial a Carmen Diéguez, por toda la ayuda recibida.

A mis compañeros del grupo pistacho de IMIDRA, Jesús Alegre, Noe y Pablo, muchísimas gracias, he aprendido muchísimo, tanto como investigador y como persona a lo largo de todos estos años con vosotros. De cada uno de vosotros he aprendido alguna cualidad, de Jesús el espíritu crítico, de Noe, ser una persona metódica y de Pablo la perseverancia.

A mis compañeros de tijera y navaja, “Angelito”, Luis, “Chemita”, Donato, Jesús, Noe y Pablo, laboratorios no lo sé, pero terruño he pisado unos pocos.

A mi familia, en especial a mi madre y mi hermano, que gracias a vuestro esfuerzo y enseñanzas me he convertido en la persona que soy hoy.

A ti Pekita, y es que dudo que este trabajo hubiera visto la luz si no hubieses sido tan inspiradora, gracias por estar ahí, compartir estos últimos meses de estrés y hacerme sentir que siempre tendré un apoyo y que no caeré a plomo, no me sueltes.

A mis compañeros de IMIDRA, gracias por vuestros consejos y tertulias de café.

A mis queridos amigos, por tanto, y por tan poco, que os voy a decir que no sepáis.

A los “Agrochuzos” por todos los buenos ratos pasados juntos, muchas gracias.

A mis queridos compañer@s de tablas, esa buena gente de ISHTAR, por tantas y tantas horas de felicidad.

A mis compañeros de Gedeá, “Egea”, “Champi” y “Candela”, hoy da un paso más aquella utopía que llamamos “Pistachogrado”.

A mi inseparable compi de cordada, con este trabajo “Luisao”, me apunto otra montaña al cuaderno de piadas.

No me gustaría terminar estas líneas sin dar un especial agradecimiento a tantas y tantas personas que hicieron posible este trabajo, trabajadores de IMIDRA (Antoñito, Isabel, “Don Pablo”, Juampe, Goyo, Jose, Cristina...), estudiantes de prácticas (“Chemita”, “Lauri”, Lucas, Javi, Carmen...), a mis compañeras de la sala de becarios (“Sari”, Clara, Mari Cruz, Irene, Elena, Judith...) y a fin de no liarla, a toda persona que haya participado en el proyecto.

Por último y como dice la canción, ¡Gracias a la vida, que me ha dado tanto!

¡Salúd!

## Abstract

The 69% of the pistachio area cultivated in Spain is under rainfed conditions. Of the percentage under irrigated conditions, the water supplies granted to this crop do not cover the optimal needs of the trees. The objective of this doctoral thesis was to study the physiological and productive response of pistachio trees, analyzing the effect of rootstock and water stress. For this purpose, three trials were carried out, two of them to study the influence of rootstock on the cultivar under stress conditions in the field and greenhouse and one to study the effect of controlled deficit irrigation (RDI) in the long term in an adult orchard. The rootstock has an influence on the physiological response to water stress of the grafted cultivar. To study the response of each of the three most commonly used rootstocks in Spain, two trials were carried out, one in the field comparing irrigated and rainfed, and the other under controlled conditions by adding PEG-6000 to the nutrient solution of the plants to increase the osmotic potential. The intensity and duration of stress, together with the limited development of the root system in the field and in pots, caused the plants to show different physiological responses to stress in both situations. Under controlled conditions, *Pistacia terebinthus* showed stress symptoms that it did not show in the field, such as stomatal conductance or decreased chlorophyll concentration. UCB-1 and *Pistacia atlantica* Desf. induced higher transpiration to the Kerman variety. UCB-1 was the rootstock that least reduced its percentage chlorophyll concentration due to stress and induced higher growth under the conditions. UCB-1 showed good adaptive characteristics to water stress. Irrigated plants grafted on *Pistacia terebinthus* L. were the most productive, so this rootstock induces greater productive earliness to the Kerman cultivar.

RDI is an irrigation management strategy where water is applied according to the phenological stage. Four irrigation treatments were tested, differentiated by the stem water potential threshold reached during stage II of fruit development (coinciding with the hardening of the peel), a stage previously described as the most tolerant to water stress. The RDI treatments were irrigated according to the established water potential threshold for each of the phases, being for T1 and T2 -2 MPa during phase II and -2.5 MPa for T3. In addition, in treatments T2 and T3, the aforementioned water potential threshold was maintained for fifteen days after the end of phase II. During phase III of fruit development (embryo growth), T1 was irrigated the same as the control treatment, T2 started its recovery fifteen days

later and then was irrigated on demand. T3 started its recovery fifteen days later than the end of phase II and its threshold water potential during phase III was -2 MPa. With the irrigation restrictions imposed, water savings relative to the control of 37% for T1, 47% for T2 and 67% for T3 were achieved. The water allocations used for the control and the three RDC treatments were 490 mm for the control, 305 mm for T1, 258 mm for T2 and 163 mm for T3. The irrigation restrictions affected the quality of the harvest, with T3 being the treatment that showed the lowest percentage of open fruit and the highest percentage of empty fruit. In view of the results obtained, given the irrigation allocations granted for pistachio cultivation in most hydrographic confederations, the implementation of RDI strategies are a viable solution for sustainable production of this crop. Plants increased their flavonol concentration due to water stress under controlled greenhouse and field conditions. The monitoring of flavonol concentration as an indicator of plant stress is interesting as it is an easy and non-destructive measurement.

## Resumen

El 69% de la superficie cultivada de pistacho en España se realiza en condiciones de secano. Del porcentaje en regadío, las dotaciones hídricas concedidas a este cultivo no llegan a cubrir las necesidades óptimas de los árboles. El objetivo de esta tesis doctoral fue estudiar la respuesta fisiológica y productiva del pistachero, analizando el efecto del patrón y el estrés hídrico. Para ello, se plantearon tres ensayos, dos de ellos para estudiar la influencia del patrón en la variedad ante condiciones de estrés en campo e invernadero y uno para estudiar el efecto del riego deficitario controlado (RDC) a largo plazo en una plantación adulta. El patrón tiene influencia sobre la respuesta fisiológica al estrés hídrico de la variedad injertada. Para estudiar la respuesta de cada uno de los tres patrones más utilizados en España, se realizaron dos ensayos, uno en campo comparando regadío y secano, y otro en condiciones controladas añadiendo PEG-6000 a la solución nutritiva de las plantas para aumentar el potencial osmótico. La intensidad y duración del estrés, unido a la limitación de desarrollo del sistema radicular en campo y en maceta, hicieron que las plantas mostrasen respuestas fisiológicas diferentes al estrés en ambas situaciones. En condiciones controladas *Pistacia terebinthus* mostró síntomas de estrés que no mostró en campo, como cierre estomático o disminución de concentración de clorofilas. UCB-1 y *Pistacia atlantica* Desf. inducen mayor transpiración a la variedad Kerman. UCB-1 fue el patrón que menos redujo su concentración de clorofila porcentualmente debido al estrés e indujo mayor crecimiento en las condiciones. UCB-1 mostró buenas características adaptativas al estrés hídrico. Las plantas en regadío injertadas sobre *Pistacia terebinthus* L. fueron las más productivas, por lo que este patrón induce mayor precocidad productiva a la variedad Kerman.

El RDC es una estrategia de manejo del riego donde se aplica agua en función del estado fenológico. Se testaron cuatro tratamientos de riego diferenciados entre sí por el umbral de potencial hídrico de tallo que se alcanzaba durante la fase II de desarrollo del fruto (coincidente con el endurecimiento de la cáscara), fase descrita previamente como la más tolerante a estrés hídrico. Los tratamientos RDC se regaron de acuerdo al umbral establecido de potencial hídrico para cada una de las fases, siendo para T1 y T2 -2 MPa durante la fase II y -2,5 MPa para T3. Además, en los tratamientos T2 y T3 se mantuvo quince días más el umbral de potencial hídrico mencionado tras la finalización de la fase II. Durante la fase III de

desarrollo del fruto (crecimiento del embrión), T1 se regó igual que el tratamiento control, T2 inició su recuperación quince días más tarde y después se regó a demanda. T3 inició su recuperación quince días más tarde de la finalización de la fase II y su potencial hídrico umbral durante la fase III fue de -2 MPa. Con las restricciones de riego impuestas, se consiguió un ahorro de agua con respecto al control de 37% para T1, 47% para T2 y 67% para T3. Las dotaciones hídricas empleadas para el control y los tres tratamientos RDC fueron de 490 mm para el control, 305 mm para T1, 258 mm para T2 y 163 mm para T3. Las restricciones de riego afectaron a la calidad de la cosecha, siendo T3 el tratamiento que mostró menor porcentaje de frutos abiertos y mayor porcentaje de frutos vacíos. A la vista de los resultados obtenidos, dadas las dotaciones de riego concedidas para el cultivo del pistacho en la mayoría de confederaciones hidrográficas, la implementación de estrategias de RDC son una solución viable para una producción sostenible de este cultivo. Las plantas aumentaron su concentración de flavonoles debido al estrés hídrico en condiciones controladas de invernadero y en campo. El monitoreo de la concentración de flavonoles como indicador de estrés en las plantas es interesante ya que es una medida fácil de realizar y no destructiva.

# Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Objetivos .....	6
2. Estado de la cuestión.	9
2.1. Origen, taxonomía y características morfológicas.....	9
2.2. Situación del cultivo del pistacho a nivel mundial, nacional y mercado del pistacho.....	11
2.3. Fenología del cultivo .....	14
2.3.1. Floración y desarrollo del fruto.....	15
2.3.2. Crecimiento vegetativo.....	17
2.4. Ecología del cultivo .....	18
2.4.1. Clima.....	18
2.4.2. Requerimientos edafológicos .....	18
2.5. Portainjertos o Patrones .....	19
2.5.1. <i>Pistacia terebinthus</i> L. ....	19
2.5.2. <i>Pistacia atlantica</i> Desf. ....	19
2.5.3. UCB-1 .....	20
2.6. Perspectivas de cambio climático. ....	20
2.7. Efecto del estrés hídrico en las plantas.....	23
3. Material y métodos	27
3.1. Diseño experimental.....	27
3.1.1. Ensayo 1: Efecto del patrón en el estrés hídrico, parámetros fisiológicos y crecimiento. ....	27
3.1.2. Ensayo 2: Efecto del patrón sobre parámetros fisiológicos y producción de plantas en secano y regadío. ....	28
3.1.3. Ensayo 3: Efecto en la producción y en la calidad de la producción del RDI en árboles adultos de pistacho. ....	29
3.2. Características edáficas.....	30
3.2.1. Ensayo 2: Efecto del patrón sobre parámetros fisiológicos y producción de plantas en secano y regadío. ....	30
3.2.2. Ensayo 3: Estrategias de RDC .....	32
3.3. Características climáticas .....	34
3.3.1. Ensayo 2: .....	34
3.3.2. Ensayo 3: Estrategias de RDC .....	35
3.4. Material Vegetal.....	37
3.5. Régimen hídrico. ....	39
3.5.1. Ensayo 2 .....	39
3.5.2. Ensayo 3 .....	39

3.6. Estado fisiológico .....	41
3.6.1. Potencial hídrico.....	41
3.6.2. Medidas de intercambio gaseoso y fotosíntesis. ....	42
3.7. Determinación de clorofila y polifenoles. ....	42
3.8. Crecimiento y Biomasa. ....	43
3.8.1. Ensayo 1. ....	43
3.8.2. Ensayo 2 .....	43
3.8.3. Ensayo 3. ....	44
3.9. Producción .....	45
3.9.1. Ensayo 2 .....	45
3.9.2. Ensayo 3 .....	45
3.10. Análisis estadístico. ....	46
3.10.1. Ensayo 1 .....	46
3.10.2. Ensayo 2 .....	46
3.10.3. Ensayo 3 .....	46
4. Resultados .....	47
4.1. Ensayo 1: Efecto del patrón en el estrés hídrico creado con PEG-6000, parámetros fisiológicos y crecimiento.....	47
4.1.1. Potencial hídrico de tallo. ....	47
4.1.2. Parámetros fotosintéticos e intercambio gaseoso. ....	48
4.1.3. Eficiencia de carboxilación, eficiencia intrínseca en el uso del agua, eficiencia instantánea en el uso de agua y Fv/Fm. 51	
4.1.4. Concentración en hoja de clorofila, flavonoles y antocianinas.....	53
.....	54
4.1.5. Biomasa.....	55
4.2. Ensayo 2: Efecto del patrón en parámetros fisiológicos, crecimiento y producción en plantas en regadío y en secano. ....	58
4.2.1. Potencial hídrico.....	58
4.2.2. Parámetros fotosintéticos (conductancia estomática y transpiración). ....	59
4.2.3. Concentración en hoja de clorofila, flavonoles y antocianinas. ....	60
4.2.4. Biomasa y crecimiento de las plantas.....	64
4.2.5. Producción. ....	65
4.3. Ensayo 3: Efecto del RDC en árboles adultos de <i>P. vera</i> L cv. Kerman sobre <i>P. terebinthus</i> en contenido de pigmentos de hoja, crecimiento, producción y calidad de cosecha. ....	66
4.3.1. Potencial hídrico de tallo y dosis de riego .....	66
4.3.2. Clorofila, flavonoles y antocianinas. ....	69
4.3.3. Crecimiento.....	70
4.3.4. Producción, peso de fruto y número de frutos por árbol.....	70
4.3.5. Calidad de cosecha.....	72
4.3.6. Coeficientes de variación de la producción. ....	76
5. Discusión .....	77
5.1. Caracterizar las respuestas del pistachero, comparando el efecto del patrón cuando se aplica el estrés en condiciones contraladas (Ensayo 1). ....	77

5.2. Caracterizar las respuestas del pistachero, comparando el efecto del patrón cuando se aplica el estrés en condiciones de campo (Ensayo 2). .....	80
5.2.1.    Parámetros de estrés. ....	80
5.2.2.    Crecimiento y Producción. ....	82
5.3. Comparativa de las respuestas del pistachero cuando el estrés se ha producido en condiciones controladas y en campo (Ensayo 1 y 2). .....	83
5.4. Estudio de estrategias RDC, comparativa de nuevos umbrales de potencial hídrico de tallo en fase II y periodo de estrés en fase III (Ensayo 3).....	85
5.4.1.    Potenciales hídricos y riego aplicado.....	85
5.4.2.    Concentración en hoja de clorofila, Flavonoles y Antocianinas. ....	85
5.4.3.    Crecimiento de las plantas. ....	86
5.4.4.    Cantidad de cosecha .....	87
5.4.5.    Calidad de cosecha.....	88
5.5. Evaluación de la variación de clorofila y polifenoles en hoja como posibles indicadores de estrés de plantas de pistachero (Ensayo 1, 2 y 3). .....	89
6. Conclusiones	91
Referencias	93
Anexos	103

# Lista de Figuras

Figura 2.2.1 Distribución de la superficie cultivada de pistacho en España por Comunidades Autónomas (Anuario estadística 2022, MAPA).	13
Figura 2.6.2 Aumento de la temperatura mínima anual durante el periodo 2046-2065 en un escenario de emisiones medias de GEI (izquierda) y en un escenario de altas emisiones GEI (derecha). Fuente: AEMet.	21
Figura 2.6.3. Variación de la precipitación media anual (%) en España para el periodo 2046-2065 en un escenario de emisiones medias GEI (izquierda) y en un escenario de altas emisiones GEI (Derecha). Fuente: AEMet.	22
Figura 3.1.1.1 Esquema del diseño del ensayo realizado en invernadero, donde se muestra el bidón con la solución nutritiva, bomba y distribución de las plantas y de goteros (Derecha). Imagen del ensayo (Derecha).	28
Figura 3.1.3.1 Vista aérea de la plantación de pistacho situada en la Finca “La Isla”, Arganda del Rey, Madrid, España.	29
Figura 3.2.1.1 Perfil del Suelo adyacente a la plantación de pistachos.	31
Figura 3.2.2.1 Calicatas realizadas en la plantación experimental de pistachos de “La Isla”, en Arganda del Rey. En el panel de la izquierda está la calicata realizada en el extremo sureste y en el panel de la derecha, la calicata realizada en el extremo noroeste.	33
Figura 3.3.1.1 Climograma de la Finca Experimental “La Chimenea”, en Aranjuez (Madrid) obtenido a partir de los datos meteorológicos recogidos entre 2004 y 2022: Precipitación media (P), Humedad Relativa (HR), Temperatura media (Tmed), Temperatura mínima (tmin), Temperatura máxima (TMAX).	34
Figura 3.3.2.1 Climograma de la Finca Experimental “La Isla” (Arganda del Rey) obtenido con valores de la estación meteorológica SIAR durante el periodo 2004-2016: Precipitación media (P), Humedad Relativa (HR), Temperatura media (Temp med), Temperatura mínima (Temp min), Temperatura máxima (Temp Max).	37
Figura 3.8.2.1 Aeronave DJI Matrice 300 con cámara LiDAR L1 utilizada por la empresa UTW para la determinación de la superficie y del volumen de copa.	44
Figura 3.8.2.2 Trayectoria de vuelo realizada con la aeronave DJI Matrice 300 con cámara LiDAR L1.	44
Figura 4.1.1 Potencial hídrico de tallo (MPa) medido a mediodía solar en plantas de <i>P. vera</i> cv. Kerman injertadas sobre <i>P. terebinthus</i> (PT) <i>P. atlantica</i> (PA) y UCB-1 en plantas sometidas a estrés hídrico (PEG) y tratamiento control (Control). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.	48
Figura 4.1.4.1 Concentración de clorofila (Clor) en $\text{mg cm}^{-2}$ al final del periodo de recuperación en plantas de <i>P. vera</i> L. cv. Kerman injertadas sobre <i>P. terebinthus</i> (PT), <i>P. atlantica</i> (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados	54
Figura 4.1.4.2 Concentración de flavonoles (Flav) en $\mu\text{g cm}^{-2}$ al final del periodo de recuperación en plantas de <i>P. vera</i> cv. Kerman injertadas sobre <i>P. terebinthus</i> (PT), <i>P. atlantica</i> (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados	54

- Figura 4.1.4.3 Concentración de Antocianinas (Ant) en  $\mu\text{g cm}^{-2}$  al final del periodo de recuperación en plantas de *P. vera* L. cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados. 55
- Figura 4.1.5.1. Biomasa seca de plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus*, *P. atlantica* y UCB-1 dividido en biomasa seca total (g), biomasa seca de hojas (g) y biomasa seca de ramas (g). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados. 56
- Figura 4.1.5.2 Numero de hojas planta<sup>-1</sup> de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* L. (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1 sometidas a estrés hídrico (PEG) y sin limitación de riego (Control). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados. 57
- Figura 4.1.5.3 Área foliar total de plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* L. (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1 sometidas a estrés hídrico (PEG) y sin limitación de riego (Control). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados. 57
- Figura 4.2.1.1 Potencial hídrico de tallo (MPa), medido al mediodía solar el 02/08 y el 25/08 en plantas de *Pistacia vera* L. cv Kerman injertadas sobre *Pistacia terebinthus* L. (PT), *Pistacia atlantica* Desf.(PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados. 58
- Figura 4.2.3.1. Concentración de flavonoles ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) en plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados en seco y en regadío. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados. 61
- Figura 4.3.1.1 Potencial hídrico de tallo medido en una plantación adulta de pistachos de la variedad kerman injertados sobre *P. terebinthus* durante los años 2017, 2018, 2019 y 2020. Las líneas verticales señalan la fase 2, endurecimiento de la cáscara, y la fase 3, crecimiento del embrión. T0: Se regó reponiendo la ETc de la semana anterior en todas las fases de crecimiento del fruto, con un umbral de potencial hídrico de -1,1 MPa, T1, se mantuvo en un umbral de -2 MPa durante fase 2 (línea discontinua azul) y -1,5 MPa durante fase 3; T2 fue similar a T1, pero se amplió 15 días el umbral de -2 MPa durante la fase 2, T3, su potencial umbral fue -2,5 MPa durante la fase 2 y durante 15 días más (línea discontinua roja), mientras que el umbral fue de -2 MPa durante fase 3. 67
- Figura 5.4.3.1. Ejemplo de decaimiento provocado por verticilosis tipo “thin leaf decline” (tomado de Ferguson *et al.*, 2016). 86

## Lista de Tablas

Tabla 2.3.1.1. Evolución de la producción de pistacho (Tm) en los principales productores mundiales desde la campaña 2018/19 hasta la 2022/23 (USDA, 2023a).....	12
Tabla 2.3.1.2. Evolución del cultivo del pistacho en España durante el periodo 2014-2022 (USDA 2023c). Superficie cultivada (ha), superficie en producción (ha) y producción (Tm)..	13
Tabla 2.3.1.3. Importaciones de pistacho (Tm) de la UE, por país de origen y totales, en las campañas 2019/20, 2020/21 y 2021/22. ....	14
Tabla 2.3.1.4. Exportaciones de pistacho (Tm) de la UE y países de destino en los años 2019, 2020, 2021 y 2022.....	14
Tabla 3.2.1.1 Resultados analíticos de una muestra de suelo del horizonte superficial (La Chimenea-Ap).....	32
Tabla 3.2.2.1 Resultados de las calicatas realizadas en la plantación experimental de pistachos de “La Isla” en Arganda del Rey.....	33
Tabla 3.3.1.1 Precipitación (P) y Evapotranspiración potencial según Penman-Monteith (ET <sub>0</sub> ) anual desde el inicio de la plantación hasta la actualidad. ....	35
Tabla 3.5.2.1. Coeficiente corrector (K <sub>r</sub> ) y coeficiente de cultivo utilizados para calcular la evapotranspiración de cultivo. ....	41
Tabla 4.1.2.1. . Parámetros fotosintéticos concentración de CO <sub>2</sub> subestomática (C <sub>i</sub> ) (μmol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> ), transpiración (E) (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), conductancia estomática (g <sub>s</sub> ) (mol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), fotosíntesis neta (A) (μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) medidos sobre plantas de <i>P. vera</i> cv. Kerman injertadas sobre <i>P. terebinthus</i> (PT), <i>P. atlantica</i> (PA) y UCB-1 sometidas a dos tratamientos diferentes de estrés (Control y estrés, PEG). Las medidas fueron tomadas al inicio del periodo de estrés, al final del periodo de estrés y al final del periodo de recuperación. ....	50
Tabla 4.1.3.1 Eficiencia de carboxilación (A/C <sub>i</sub> ), eficiencia intrínseca en el uso del agua (A/g <sub>s</sub> ), eficiencia instantánea en el uso del agua (WUE) y F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub> medidas en la aplicación de PEG (Inicio estrés), tras el periodo de estrés (Final estrés) y tras 14 días de regar las plantas exclusivamente con solución Hoagland (Recuperación).....	52
Tabla 4.2.2.1 Parámetros de intercambio gaseoso, conductancia estomática (g <sub>s</sub> ) y transpiración (E) medidas con sonda Li-Cor, en plantas de <i>Pistacia vera</i> L. cv Kerman injertadas sobre <i>Pistacia terebinthus</i> L., <i>Pistacia atlantica</i> Desf. y UCB-1. ....	60

Tabla 4.2.3.1. Concentración de clorofila ( $\text{mg cm}^{-2}$ ), flavonoles ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) y antocianinas ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ), medido en plantas de <i>Pistacia vera</i> L. cv. Kerman injertadas sobre <i>Pistacia terebinthus</i> L., <i>Pistacia atlantica</i> Desf. y UCB-1.....	63
Tabla 4.2.4.1. Longitud del brote (cm), diámetro del patrón (mm), diámetro de la variedad a 1 m de altura (mm), superficie de la copa ( $\text{m}^2$ ) y volumen de copa ( $\text{m}^3$ ) de plantas de <i>P. vera</i> L. cv. Kerman regadas y en secado injertadas sobre <i>P. terebinthus</i> L., <i>P. atlantica</i> Desf. y UCB-1. ....	65
Tabla 4.2.5.1. Producción y calidad de la cosecha (porcentaje de pistacho abierto, porcentaje de pistacho cerrado y porcentaje de pistacho vacío) en plantas de <i>Pistacia vera</i> L. cv. Kerman injertadas sobre <i>Pistacia terebinthus</i> L., <i>Pistacia atlantica</i> Desf. y UCB-1 .....	66
Tabla 4.3.1.1. Dotación de riego aplicada a cada tratamiento en cada fase de desarrollo del fruto (mm) y el total aplicado durante los años de estudio 2017, 2018, 2019,2020 ( $\text{mm año}^{-1}$ ) .....	68
Tabla 4.3.2.1. Concentración en hoja de clorofila ( $\text{mg cm}^{-2}$ ), flavonoles ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) y antocianinas ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ). ....	69
Tabla 4.3.3.1. Área de la copa ( $\text{m}^2$ ) y medidas de dispersión .....	70
Tabla 4.3.4.1. Cantidad de cosecha, expresado en cosecha por árbol ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ), peso medio de un fruto entero ( $\text{g fruto}^{-1}$ ) y número total de frutos en un árbol (N. frutos), de los cuatro tratamientos estudiados T0 (control), T1, T2 y T3 en los cuatro años de estudio, 2017, 2018, 2019 y 2020 y la media de los cuatro años de estudio. Las letras marcan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). ....	72
Tabla 4.3.5.1. Calidad de cosecha expresada en porcentaje de frutos abiertos, cerrados y vacíos (%), calibre de fruto (mm), peso fresco de la semilla de frutos abiertos (PFS)(g), peso seco de la semilla de frutos abiertos (PSS abiertos)(g), peso fresco de la semilla de frutos cerrados (PFS cerrados)(g), peso seco de la semilla de frutos cerrados (PSS cerrados) (g), ratio semilla/fruto de frutos abiertos y ratio semilla fruto de frutos cerrados, de los cuatro tratamientos de riego T0, T1, T2 y T3 en los cuatro años de estudio y la media de los cuatro años.....	75
La Tabla 4.3.6.1 muestra las medidas de dispersión de la producción en cada uno de los cuatro años de estudio y la media global. Las medidas de dispersión fueron mayores en los años “Off” que en los años “On” .....	76

Tabla 4.3.6.2. Medidas de dispersión de la producción por árbol en los cuatro años de estudio donde CV (coeficiente de variación), varianza, desv. Típica (desviación típica) y rango para cada uno de los años de estudio y la media global. .... 76

## Abreviaturas y Acrónimos

PT	<i>Pistacia terebinthus</i> L.
PA	<i>Pistacia atlantica</i> Desf.
UCB-1	Hibrido de <i>Pistancia atlantica</i> Desf. X <i>Pistacia intergerrima</i> Stewart.
$C_i$	Concentración de CO <sub>2</sub> subestomático
$g_s$	Conductancia estomática
E	Transpiración de la hoja
A	Fotosíntesis neta
$A/C_i$	Eficiencia de Carboxilación
$A/g_s$	Eficiencia intrínseca en el uso del agua
WUE	Eficiencia instantánea en el uso del agua
$F_v/F_m$	Fluorescencia de clorofila
Clor	Concentración en hoja de clorofila
Flav	Concentración en hoja de flavonoles
Ant	Concentración en hoja de Antocianinas
$ET_c$	Evapotranspiración de cultivo
$ET_o$	Evapotranspiración de referencia
$K_c$	Coefficiente de cultivo
$K_r$	Coefficiente corrector
RDC	Riego Deficitario Controlado



# 1. Introducción

## 1.1. Introducción

El pistacho es uno de los cultivos con mayor capacidad para tolerar el estrés hídrico y salino (Behoudian *et al.*, 1986; Galindo *et al.*, 2018) y muestra una gran capacidad para sobrevivir en condiciones extremas de sequía. En ensayos realizados por Spiegel-Roy *et al.* (1977) en Avdat, en el desierto del Negev, se comprobó que los pistachos son capaces de producir cierta cantidad de fruto incluso en condiciones muy adversas, en las que todos los horizontes del suelo llegaron a estar por debajo del punto de marchitamiento y con potenciales hídricos del suelo de hasta -12 atm. Esta capacidad se relacionó con el desarrollo de un potente sistema radicular que alcanzó los 2,40 m de profundidad y extrajo agua de horizontes muy profundos. En esas condiciones, de extrema sequía, la actividad radicular del pistacho puede cesar totalmente durante un periodo de 4-5 semanas.

Con frecuencia se ha considerado que el pistacho es una especie xerofita, pero en realidad no tiene las características morfológicas propias de este tipo de plantas y presenta valores elevados de fotosíntesis neta y conductancia estomática. Por ello algunos autores sugieren que la tolerancia del pistacho a la sequía depende, principalmente, de la evitación del estrés hídrico gracias a su capacidad para extraer agua en capas muy profundas del suelo y con bajos potenciales (Lin *et al.*, 1984; Germana, 1996). Sin embargo, Kanber *et al.* (1993) mostraron que la actividad del sistema radicular del pistacho varía con la disponibilidad de agua y se limita a zonas menos profundas del suelo cuando se reduce el intervalo entre riegos. En realidad, además de su capacidad para desarrollar un potente sistema radicular, las plantas de pistacho sometidas a restricciones hídricas muestran sofisticados mecanismos de evitación y tolerancia del estrés hídrico. Son capaces, por ejemplo, de mantener la actividad fotosintética con valores de potencial hídrico inferiores a -5 MPa (Walker *et al.*, 1998) y en función de su estado fenológico pueden modificar las respuestas a nivel de fotosíntesis y de conductancia estomática (Galindo *et al.*, 2018)

Puede parecer contradictorio, pero siendo un cultivo capaz de sobrevivir en zonas semidesérticas y de producir con recursos hídricos muy limitados, también es un

cultivo que da muy buenas respuestas productivas cuando dispone de una elevada cantidad de agua. El riego incrementa tanto la cantidad como la calidad de las cosechas y disminuye la vecería (Kanber *et al.*,1993; Goldhamer, 2005; Iniesta 2008; Marino *et al.* 2018). Por ello en los principales países productores (Irán y Estados Unidos) el pistacho se cultiva, casi exclusivamente, en regadío. Si se riega de acuerdo con sus valores de evapotranspiración (ET) las necesidades de agua para el cultivo del pistacho son muy altas. Durante el verano las plantas de pistacho pueden transpirar grandes cantidades de agua, dando valores de ET mayores que los de la mayoría de las plantas de hoja caduca (Goldhamer, 1983 y 1985) con una demanda evaporativa que puede alcanzar los 8.1 mm d<sup>-1</sup> (Iniesta *et al.*, 2008). Los valores del coeficiente de cultivo (Kc) establecidos, en pleno verano, para el pistacho varían notablemente según los autores. Kanber *et al.* (1993) lo estimaron en 0,8, Goldhamer (1995) en 1,19 e Iniesta *et al.* (2008) en 1,36. Por tanto, existe cierto grado de incertidumbre sobre las necesidades reales de riego y se recomiendan dotaciones que varían entre 550-600 mm ·ha<sup>-1</sup> (Memmi *et al.*, 2016b; Kermani y Salehi, 2006) y los 850-1000 mm ·ha<sup>-1</sup> (Goldhamer, 1995; Testi *et al.*, 2008). En California las nuevas plantaciones, realizadas sobre portainjertos y variedades más vigorosos y productivos, se están estableciendo con la expectativa de regar con 1.150 mm ·ha<sup>-1</sup> ·año<sup>-1</sup> para obtener una producción media anual de 2.500 kg de pistacho comercial por hectárea (Marino *et al.*, 2018)

En España, la superficie cultivada de pistacho está creciendo a un ritmo de 8.000 ha año<sup>-1</sup>. Como la disponibilidad de agua no permite cubrir la elevada demanda evaporativa del verano, el pistacho se cultiva mayoritariamente en secano. En España el 69 % de la superficie de cultivo es secano y el 31 % regadío. Sin embargo, las plantaciones consideradas de regadío cuentan, generalmente, con dotaciones de agua muy bajas, que en muchas ocasiones no superan los 150 mm ·ha<sup>-1</sup> ·año<sup>-1</sup>, de forma semejante a lo que sucede en otras regiones de la Cuenca Mediterránea (Marino *et al.*, 2018). En realidad, podrían considerarse plantaciones de secano que reciben un riego suplementario. Por ello, en España la gran mayoría de las plantaciones de pistacho, tanto de secano como de regadío, están sometidas a importantes periodos de estrés hídrico (Morianana *et al.*, 2018).

Se han publicado numerosos trabajos que estudian los efectos del estrés hídrico y salino en especies del género *Pistacia*, incluyendo cultivares de *P. vera* utilizados como portainjertos o como variedades. Muchos son trabajos realizados en ambiente controlado sobre plantas de menos de un año (plántulas) en los que se estudian las respuestas a nivel de fotosíntesis y de otros parámetros fisiológicos, bioquímicos o

morfológicos (Behboudian *et al.*, 1986; Ranjbarfordoei *et al.*, 2000; Arzani *et al.*, 2013; Esmaeilpour *et al.*, 2015a, 2015b y 2016; Khoyerdi *et al.*, 2016; Rahnesan *et al.*, 2018). También existen varias publicaciones que abordan los efectos del estrés hídrico sobre parámetros fisiológicos y productivos en campo, en plantaciones adultas (Goldhamer 1983 y 1985, Novello & De Palma, 1994; Sedaghati & Hokmabadi, 2015) pero son escasos los trabajos que abordan los efectos de la interacción patrón-variedad sobre la tolerancia al estrés hídrico. Sin embargo, las plantaciones de pistacho, como sucede en la mayoría de las especies frutales, están formadas en realidad por “organismos mixtos” en los que el patrón aporta el sistema radicular y la variedad la parte aérea.

El patrón suele determinar el vigor de la variedad y sus respuestas al estrés hídrico (Jones, 2012). En general patrones poco vigorosos reducen el crecimiento de la variedad porque modifican el transporte de auxinas y la conductividad hidráulica tanto de la raíz como del tallo (Ezzahouani & Williams, 1995; Atkinson *et al.*, 2003; Motisi *et al.*, 2004). Además, al menos a nivel de estrés hídrico, los efectos del patrón pueden cambiar dependiendo de la variedad que se injerte (Kumar *et al.*; 2017). La influencia del patrón se ha descrito también en pistacho. Germana (1996) observó que la variedad Nostrale injertada sobre *P. atlantica* tenía mayor transpiración y mayor actividad fotosintética que injertada sobre *P. terebinthus*. En trabajos realizados en plantaciones Ghrab *et al.* (2002) observaron que las variedades Mateur y Kerman fueron más vigorosas y tuvieron mayores contenidos de clorofila y azúcares en hoja cuando se injertaron sobre *P. atlantica* que cuando se injertaron sobre *P. vera*. En trabajos más recientes realizados con plantas en maceta Gijon *et al.* (2010), Memmi *et al.* (2016a) y Moriana *et al.* (2018) o en estudios de campo (Memmi *et al.* 2016b y 2016c) se han descrito efectos muy significativos de los tres patrones más utilizados en España (*P. terebinthus*, *P. atlántica*, UCB-1) sobre el crecimiento y las relaciones hídricas de la variedad Kerman. Sin embargo, los resultados obtenidos resultan muy contradictorios. Memmi *et al.* (2016a) concluyeron que de estos tres portainjertos UCB-1 es que el dio plantas de Kerman peor adaptadas al estrés hídrico. Moriana *et al.* (2018) observaron que las plantas de Kerman injertadas sobre UCB-1 fueron las que tuvieron mayor crecimiento vegetativo en condiciones de estrés lo que podría considerarse como una mejor adaptación, si bien, teniendo en cuenta las curvas presión volumen, el injerto sobre *P. atlantica* dio las mejores respuestas al estrés hídrico. Por otra parte, considerando las reducciones en la conductancia estomática y su mayor sensibilidad a la defoliación *P. terebinthus* podría ser un patrón más

sensible al estrés hídrico que *P. atlantica* (Memmi *et al.*; 2016b, 2016c) aunque Gijón *et al.* (2010) concluyeron lo contrario.

Estas contradicciones pueden tener su origen en el diseño de los experimentos. Es frecuente que efectos del patrón sobre las relaciones hídricas se confundan con efectos del patrón sobre el vigor general de la planta (Jones, 2012). Plantas con mayores crecimientos y más vigorosas tienden a usar más agua y por tanto secan antes el suelo, o el sustrato, que las plantas menos vigorosas. Esto puede hacer que un mayor vigor, o un mayor tamaño, se interpreten como una peor respuesta al estrés hídrico, aunque de hecho patrones vigorizantes pueden conferir a la planta mayor tolerancia a la sequía porque pueden extraer del suelo un mayor volumen de agua (Preston *et al.*, 1981). De hecho, en los ensayos de Gijón *et al.* (2010) realizados en maceta, los autores señalan un posible efecto del tamaño de plantas utilizadas. Las plantas sobre *P. atlantica* tenían menor tamaño que las plantas sobre *P. terebinthus* y esto pudo condicionar los resultados obtenidos.

Una forma de evitar los efectos del vigor y el tamaño de las plantas es cultivar en una solución que tenga un elevado potencial osmótico, de forma que el nivel de estrés hídrico sea el mismo con independencia del vigor o el tamaño de las plantas. Muchos modelos de estrés por sequía se basan en la utilización de polietilenglicol (PEG) de elevado peso molecular presumiblemente inerte (Osmolovskaya *et al.*, 2018) que limita la entrada de agua en el sistema radicular e induce estrés hídrico uniforme a lo largo del tiempo (Bressan *et al.*, 1981; Hohl & Schopfer, 1991; Lu & Neumann, 1998).

La respuesta de los árboles al estrés hídrico puede variar según el momento de la aplicación, la intensidad del estrés y su duración (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010). En algunas ocasiones se ha observado que la capacidad de adaptación al estrés hídrico mostrada en los ensayos realizados en condiciones controladas no fue mostrada en condiciones de campo. O lo contrario, que mecanismos de tolerancia observados en campo no aparecieron en condiciones de laboratorio. En algunos frutales se observaron mecanismos de tolerancia a la sequía como el ajuste osmótico y el incremento en la eficiencia en el uso del agua (WUE) que sólo se desarrollaron cuando el déficit hídrico se produjo de forma gradual y durante un periodo de tiempo prolongado, como sucede en condiciones de campo. Sin embargo, esos mecanismos de tolerancia al estrés hídrico no se expresaron cuando se realizaron ensayos en condiciones controladas (Arndt *et al.*, 2000; Torrecillas *et al.*, 2018). El

caso contrario se observó en *Ziziphus mauritiana*, que tras un periodo de sequía de 100 días no mostró una disminución significativa del potencial hídrico ni acumulación de solutos, pero si mostró control estomático y ajuste osmótico en invernadero. Se trata de una especie que, en condiciones de campo, basó su adaptación a la sequía en un gran sistema radicular que permitió la evitación y no necesitó expresar mecanismos de tolerancia. Arndt *et al.* (2000) consideraron que es una adaptación única porque *Ziziphus mauritiana* exhibió tanto una estrategia para evitar la sequía como la capacidad de aclimatarse mediante osmorregulación activa, y esto explicaría su capacidad para habitar con éxito en ambientes áridos en todo el mundo.

En el Mediterráneo existe una gran extensión de plantaciones de pistacho en secano (Turquía, España, Grecia, Italia o Túnez) pero los estudios realizados para evaluar la cantidad y calidad de las cosechas en estas condiciones de cultivo son escasos (Ouni *et al.*, 2022) como lo son también los estudios sobre relaciones hídricas en estas condiciones de manejo y en condiciones de riego de apoyo.

La baja disponibilidad de agua en las zonas regables de la cuenca mediterránea ha promovido la mejora tanto de los sistemas de riego como de la programación de estos. Históricamente, las programaciones de los riegos se basaban en balances de la evapotranspiración. Sin embargo, el uso de las metodologías tradicionales conducía a una baja optimización del suministro de agua, siendo en ocasiones impreciso en tiempo y cantidades, ya que el uso del agua por parte de los árboles resulta ser un proceso complejo integrado por múltiples factores. En una agricultura con recursos hídricos muy limitados es básico mejorar la productividad del agua y definir las mejores estrategias de riego deficitario (Fererres y Soriano, 2007).

Las estrategias de riego deficitario controlado (RDC) tienen un enfoque fisiológico basado en la fenología del cultivo y en su capacidad para soportar condiciones de estrés hídrico en periodos específicos (Goldhamer 1985, Memmi, 2016d). En el caso del pistachero, se ha descrito que niveles de estrés moderado durante la fase I puede aumentar el porcentaje de frutos abiertos (Goldhamer, 2005). Por otro lado, ha sido descrito que la fase II de desarrollo del fruto, es la fase más resistente a estrés hídrico y que la fase III (crecimiento rápido del embrión) es la más sensible al estrés (Goldhamer 1985). Memmi (2016d) observó que reducciones de riego, programadas en base al uso de un potencial hídrico umbral durante la fase II (-1,5 MPa y -2 MPa), pero regando a demanda durante la fase III de desarrollo del fruto, no afectaron a la producción ni a la calidad de esta.

Las determinaciones del estrés hídrico suelen necesitar medidas complejas de realizar. Para determinar el potencial hídrico de tallo se necesita transportar aparatos voluminosos. Además, al menos en el pistacho, su significado fisiológico parece depender del estado fenológico. Marino *et al.* (2018) sugirieron que otros parámetros, como la conductancia estomática, podrían ser más útiles para detectar el estrés, pero su medida necesita de aparatos en ocasiones muy costosos. Las clorofilas pueden ser degradadas como consecuencia del estrés hídrico (Esmaeilpour, 2015a) y las variaciones en la concentración de polifenoles (flavonoles y antocianinas) también se consideran un indicador del estrés hídrico (Chalker-Scot 1999 y 2002). Con el fin de evaluar su interés como indicadores de estrés en pistacho, se estudiaron las variaciones en la concentración de clorofilas y polifenoles en hoja, bajo diferentes condiciones de estrés utilizando una pinza Dualex.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal fue caracterizar la respuesta del pistachero al estrés hídrico y la interacción entre el patrón y la variedad. Para ello, se utilizaron la variedad (Kerman) y los patrones *P. terebinthus*, *P. atlantica* y UCB1, los más utilizados en España. Se evaluó la respuesta al estrés hídrico en condiciones controladas, añadiendo PEG-6000, y en condiciones de campo. Por otra parte, se realizó un ensayo de riego deficitario controlado (RDC) para optimizar el uso del agua en nuestras condiciones de cultivo.

1. Caracterizar las respuestas del pistachero, comparando el efecto del patrón cuando se aplica el estrés en condiciones controladas. Se determinó la variación de parámetros fisiológicos: intercambio gaseoso, fotosíntesis, potencial hídrico, contenido en hoja de clorofilas y polifenoles y crecimiento. Durante el periodo de estrés y tras una fase de recuperación.
2. Caracterizar las respuestas fisiológicas, productivas y de crecimiento, comparando el efecto del patrón, cuando el estrés hídrico se produce en condiciones de campo. Comparando el régimen de secano y el de regadío.
3. Comparar las respuestas del pistachero cuando el estrés se ha producido en condiciones controladas y las obtenidas en campo.
4. Estudiar estrategias de RDC, comparando los umbrales estudiados hasta el momento, con estrategias que incluyan mayores niveles de estrés en fase II (endurecimiento de la cáscara) y periodos de estrés durante la fase III (llenado del fruto).

5. Testar la variación de clorofila y polifenoles en hoja como posibles indicadores de estrés de plantas de pistachero.



## 2. Estado de la cuestión.

### 2.1. Origen, taxonomía y características morfológicas.

La presencia de pistachos en excavaciones arqueológicas proporciona la evidencia de que el pistacho ha sido consumido por el hombre desde hace mucho tiempo. En Irán y Afganistán se han encontrado restos de pistachos que datan del sexto milenio A.C. Aun hoy existen poblaciones naturales de pistacho que forman bosque adhesados en Afganistán (Mahmoodi *et al.*, 2023) y otros países de Asia Central. Desde su centro de origen el cultivo se extendió por el antiguo Imperio Persa y gradualmente hacia el oeste. Hormaza *et al.* (1994) y Al-Saghir (2009) realizaron una descripción exhaustiva de la historia del cultivo. Parece que, en Asiria, alrededor del siglo X A.C., la reina de Saba monopolizó la limitada producción de pistachos para su propio consumo, también se sabe que se plantaron árboles de pistacho en los jardines de Babilonia en el siglo VIII A.C, y la Biblia (Génesis 43: 1 l) se refiere al pistacho como “frutos preciosos llevados a Egipto por los hijos de Jacob”.

En el siglo primero A.C. Poseidonio encontró cultivos de pistacho en Siria, país que fue considerado erróneamente por griegos y romanos como el origen del cultivo. En Italia el cultivo se introdujo en época del emperador Tiberio. Desde Italia llegó a España de la mano de Flavio Pompeyo y, probablemente, en esa misma época se introdujo en otras zonas del Mediterráneo, norte de África y el Oriente Medio (Hormaza *et al.*, 1994). Existe constancia de que el pistacho llegó a España por primera vez unos 30 años antes del nacimiento de Cristo, sin embargo, su cultivo solo se desarrolló muy posteriormente, durante el dominio árabe, y desapareció a lo largo del siglo XVII tras la expulsión de los moriscos. A partir de 1980 se produjo una reintroducción del cultivo del pistacho en España, primero a través de centros de investigación de Aragón y Cataluña y después debido, sobre todo, a la actividad del Centro de Investigación del Chaparrillo en Castilla la Mancha.

*Pistacia vera* L. pertenece al género *Pistacia* L., dentro de la familia Anacardiaceae, orden Sapindales (Stevens, 2008). Dentro de esta familia encontramos otras especies como anacardos, mango o árbol de la pimienta. Las especies pertenecientes al género son xerofíticas, de porte arbóreo o arbustivo, con

altura variable de 1-5 m hasta los 8-10 m de altura. Hojas pinnati-compuestas, pecioladas, con foliolos elípticos u ovalados. Siendo un género dioico, las flores femeninas y masculinas crecen en árboles distintos. En ambos pies, femenino y masculino, las flores son apétalas, unisexuales y se agrupan en panículas. Estas contienen entre una y varios cientos de flores, que son formadas el año anterior (Zohary, 1952). Según la hipótesis de Al-saghir (2010), *Pistacia vera* L., es la especie más primitiva del género. Árbol de hoja caduca, las cuales están orientadas aleatoria e isobilateralmente, con raquis no alado. *Pistacia vera* L. es la única especie del género con una anatomía interna de los foliolos heterogénea. Las células en empalizada de la cara abaxial parecen ser ligeramente más largas que las de otras especies del género mientras que las células en empalizada de la cara adaxial son más cortas que las de otras especies. Tiene una densidad estomática entre 226 y 304 estomas por milímetro cuadrado, para el haz y el envés respectivamente (Lin *et al.*, 1984).

La polinización de *Pistacia vera* L. es anemófila. Las inflorescencias masculinas son compuestas por 450-500 flores dispuestas en ejes de crecimiento del año anterior (Mlika, 1980). Las inflorescencias femeninas miden entre 5 y 10 cm de longitud. Son más largas que las inflorescencias masculinas y tienen alrededor de 190-260 flores (Crane & Iwakiri, 1981).

Los frutos son drupas, como almendras, albaricoques y melocotones. La diferencia reside en la parte comestible de estos. En el caso de almendra y pistacho, la parte comestible es la semilla, en lugar del mesocarpo en el caso de frutales de hueso. Todas las drupas consisten en tres partes: exocarpo y mesocarpo carnosos que rodean a un endocarpo duro (cáscara en el caso del pistacho) dehiscente cuando está maduro. La parte comercializable del pistacho comprende el endocarpo (cáscara) y la semilla, la cual tiene una cubierta que va del color amarillento al verde (Hormaza & Wunsch, 2007).

El pistachero es un árbol xerofítico adaptado a una gran variedad de suelos, capaz de sobrevivir a largos periodos de sequía (Ferguson *et al.*, 2005). Tienen un sistema radicular muy extenso capaz de explorar el suelo en profundidad, absorbiendo agua de las capas subsuperficiales.

## 2.2. Situación del cultivo del pistacho a nivel mundial, nacional y mercado del pistacho.

*Pistacia vera* L. (pistacho cultivado) es la única especie del género con importancia económica. Tiene semillas comestibles de gran valor nutricional. Las otras especies del género no se suelen cultivar, aunque en algunos casos sus semillas son usadas para producir portainjertos de pistacho, o se consumen sus frutos o de ellas se extraen aceites o resinas (Al-Saghir, 2009).

Según FAOSTAT (2020) la superficie cultivada de pistacho a nivel mundial eran 830.826 has y se producían 1.125.305 toneladas de pistacho. Según esa misma fuente, en Turquía había 381.847 ha, en Irán 162.960 has, en Estados Unidos 150.543 has y en Túnez 27.618 has. Estados Unidos, Irán y Turquía son los principales productores mundiales, con el 85% de la producción total. Estados Unidos produjo en 2020, 474.004 Tm, Turquía 296.376 Tm e Irán 190.000 Tm.

Los datos de producción varían ligeramente según la fuente consultada. En la Tabla 2.2.2 se muestra la evolución de la producción de pistacho en los principales productores mundiales desde la campaña 2018/19 hasta la 2022/23 según datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. El primer productor mundial de pistacho es Estados Unidos, donde el pistacho es un cultivo de regadío, con producciones medias de 2.500 kg/ha. Exporta el 50 % de su producción y alcanzó un máximo de producción en la campaña 2021/22 con 523.899 Tm. En este país el cultivo continúa creciendo a un ritmo del 5 % anual y se espera alcanzar las 400.000 has durante esta década. Turquía ha desplazado a Irán como segundo productor mundial y está modernizando su sistema de producción. Su pistacho se produce mayoritariamente en secano, con baja densidad de plantación. Su producción sufre importantes oscilaciones anuales a consecuencia de una vecería muy marcada asociada a su forma de producir y al envejecimiento de las plantaciones (Ak & Harada, 2015; Aydin & Pakyürek, 2021). La mayoría del pistacho turco se destina al consumo doméstico (USDA, 2023b). Irán fue el principal productor mundial de pistacho. En 2013 produjo 478.600 Tm (Ak & Harada, 2015) diez años después, en 2023, su producción ha caído hasta las 106.000 Tm que le sitúan como tercer productor a nivel mundial. Su producción se realiza en regadío, en la llanura de Rafsanjan (provincia de Kerman) a una altitud media de 1.514 m. La producción iraní se destina básicamente a la exportación, pero el sector del pistacho está pasando una profunda crisis como consecuencia de

la mala gestión de los recursos hídricos (Darijani *et al.*, 2019) y la salinización del suelo (Salehi & Hosseinifard, 2012).

Tabla 2.3.1.1. Evolución de la producción de pistacho (Tm) en los principales productores mundiales desde la campaña 2018/19 hasta la 2022/23 (USDA, 2023a).

Campaña	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	
					febrero	octubre
Estados Unidos	447.696	336.112	474.004	523.899	401.039	400.069
Turquía	210.000	85.000	250.000	87.000	210.000	200.000
Irán	52.000	205.000	190.000	135.000	106.000	106.000
Siria	60.000	70.000	50.000	60.000	50.000	50.000
Unión Europea	10.610	21.600	20.747	24.815	23.940	25.800
<b>TOTAL</b>	<b>780.306</b>	<b>717.712</b>	<b>984.751</b>	<b>830.714</b>	<b>790.979</b>	<b>781.869</b>

En la campaña 2022/23 la superficie de pistacho en la Unión Europea era de 83.210 ha, repartidas entre España (70.235 ha), Grecia (5.563 ha) e Italia (3.870 ha). España produjo 19.889 Tm, Grecia 11.836 Tm, e Italia 3.873 Tm (USDA 2023c). España se ha convertido en el principal productor de la Unión Europea y la superficie de pistacho se encuentra en plena expansión. De 2014 a 2021, la superficie plantada de pistacho en España aumentó un 370% y la producción un 313%, alcanzando las 19.889 Tm en 2022 (Tabla 2.3.1.2). El punto de inflexión se produjo en 2015 cuando el ritmo plantación se aceleró, con más de 4.000 nuevas hectáreas cada año. Los próximos cinco años serán claves para el sector pistachero español con la entrada en producción de la gran mayoría de la superficie plantada.

Tabla 2.3.1.2. Evolución del cultivo del pistacho en España durante el periodo 2014-2022 (USDA 2023c). Superficie cultivada (ha), superficie en producción (ha) y producción (Tm).

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Sup.Cultivada	7.334	10.529	14.974	20.415	29.235	39.456	49.534	61.231	70.235
Sup. en producción	4.617	5.362	6.467	8.802	9.930	13.815	15.427	18.112	23.264
Producción	4.052	4.764	5.618	7.545	8.210	13.106	14.337	16.725	19.889

De las 70.265 has cultivadas en España, el 69% aproximadamente están en condiciones de secano. La comunidad autónoma con más superficie cultivada es Castilla-La Mancha, seguida de Andalucía y Castilla y León (Figura 2.2.1).

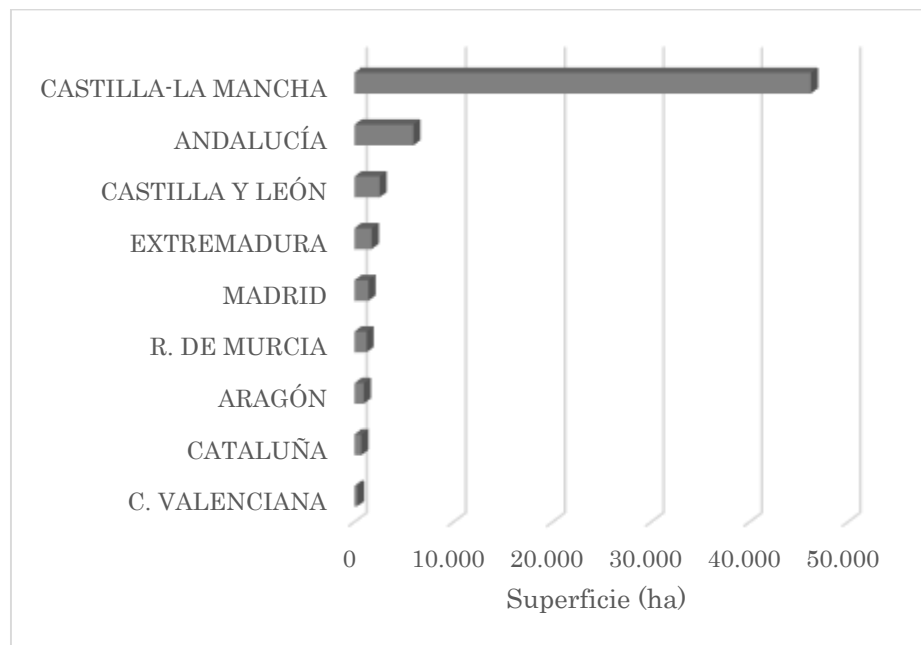


Figura 2.2.1 Distribución de la superficie cultivada de pistacho en España por Comunidades Autónomas (Anuario estadística 2022, MAPA).

La UE es el mayor importador de pistachos del mundo, con importaciones que superan ampliamente las 100.000 Tm anuales. La mayoría de las importaciones proceden de EE. UU. y en menor medida de Irán (Tabla 2.2.5).

Tabla 2.3.1.3. Importaciones de pistacho (Tm) de la UE, por país de origen y totales, en las campañas 2019/20, 2020/21 y 2021/22.

País de Origen	2019/20	2020/21	2021/22
Estados Unidos	75.021	78.173	87.485
Irán	22.793	32.792	19.825
Turquía	2.993	9.094	12.279
Siria	126	454	541
Otros	118	1.352	1.021
<b>Total</b>	<b>102.113</b>	<b>121.865</b>	<b>121.151</b>

La UE exportó alrededor de 4000 toneladas de pistacho en 2019, 2020 y 2021. Los destinos de exportación de pistacho de la UE fueron Reino Unido, Suiza y Turquía (Tabla 2.2.7).

Tabla 2.3.1.4. Exportaciones de pistacho (Tm) de la UE y países de destino en los años 2019, 2020, 2021 y 2022.

País de destino	2019/20	2020/21	2021/22
Reino Unido	2.959	2.796	1.654
Suiza	312	347	401
Turquía	0	4	269
Marruecos	112	450	203
Otros	706	1.105	1.125
<b>Total</b>	<b>4.089</b>	<b>4.702</b>	<b>3.652</b>

### 2.3. Fenología del cultivo.

El ciclo fenológico anual del pistacho se puede dividir en dos fases: floración y desarrollo del fruto por un lado y crecimiento vegetativo por el otro. Ambos procesos están muy relacionados fisiológicamente (Ferguson, 2016).

### 2.3.1. Floración y desarrollo del fruto.

La floración se produce desde finales de marzo hasta abril, en las condiciones del centro de España, dependiendo de la variedad, condiciones bióticas y abióticas, las yemas de flor comienzan su desarrollo (Couceiro *et al.*, 2017) como se puede observar en las Figuras 2.3.1.1 y 2.3.1.2. Durante la polinización y fecundación se da una caída de flores femeninas significativa de la panícula simultánea al cuajado de los frutos (Figura 2.3.1.3). Tras la floración y el cuajado de los frutos, tiene lugar el crecimiento longitudinal y transversal del pericarpio (Fereres *et al.*, 2012), que finaliza entre los 30 días después de floración (Shuraki & Sedgley, 1996) y los 50 días de floración (Spann *et al.*, 2009). Este desarrollo se culmina antes o después según los factores climáticos (Salcedo, 2022).

Durante el mes de junio y parte del mes de julio, el crecimiento del fruto se ralentiza. Durante este periodo se produce la lignificación del endocarpio (Memmi *et al.*, 2016). El crecimiento del embrión comienza antes de que la cáscara termine de endurecer (Allan, 2015, Salcedo, 2022), coincidiendo el endurecimiento con el inicio del crecimiento de la semilla (Figura 2.3.1.4), que suele comenzar a finales de julio-comienzos de agosto. En los frutos cuajados, la semilla crece ocupando todo el lóculo formado por el pericarpio.



Figura 2.3.1.1. Floración del cultivar hembra Kerman en la Finca Experimental “La Isla” en Arganda del Rey. Las yemas florales pasan por diversos estados de desarrollo: A, yemas florales en invierno, B, Yemas florales hinchadas, C, brácteas florales comenzando a separarse, D, las flores permanecen replegadas pero los estigmas comienzan a ser visibles, E, flores desplegadas en plena floración y F, fruto cuajado.

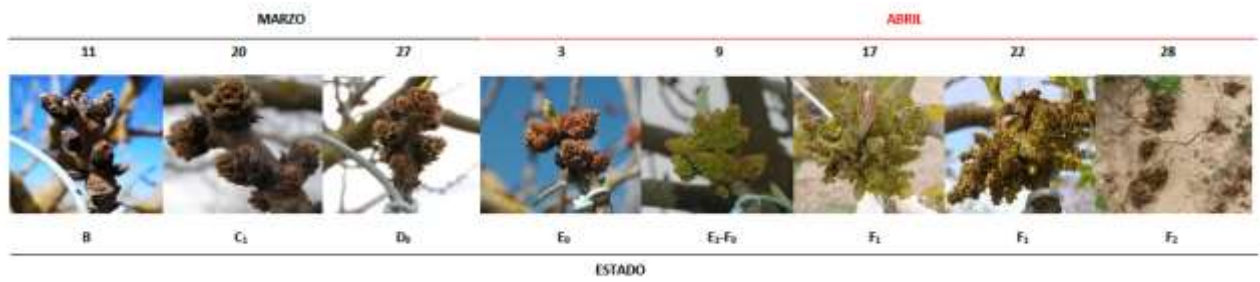


Figura 2.3.1.2. Floración del cultivar macho Peter en la Finca Experimental “La Isla” en Arganda del Rey. Las yemas florales pasan por diversos estados de desarrollo: A, yemas florales en invierno, B, Yemas florales hinchadas, C, brácteas florales comenzando a separarse, D, las flores permanecen replegadas pero los estambres son completamente visibles, E, flores desplegadas en plena floración, con los estambres cambiando de rojo a amarillo y F, flores en plena polinización.

Simultáneamente a este proceso, debido a circunstancias fisiológicas, ocurre un proceso de abscisión de yemas (Goldhamer, 2012). A finales de agosto-comienzos de septiembre, la semilla alcanza su tamaño máximo y el fruto madura, la sutura longitudinal de la cascara se abre, la piel se degrada, siendo más fácil separar el exocarpio y el mesocarpio del endocarpio y comienza la abscisión de algunos frutos desde el raquis (Figura 2.3.1.5).



Figura 2.3.1.3. Frutos de pistacho a los seis días y a los 20 días de plena floración en la Finca Experimental La Isla. Se produce un rápido crecimiento del fruto y una selección de frutos que suele acabar con 14 frutos/racimo.



Figura 2.3.1.4. Endocarpio en proceso de lignificación y crecimiento de la semilla a los 90 días desde plena floración.



Figura 2.3.1.5. Racimo de pistachos maduros listos para su recolección, con la vaina separada de la cáscara a los 145 días después de plena floración.

### 2.3.2. Crecimiento vegetativo.

El crecimiento vegetativo se inicia tras la floración, aproximadamente desde mediados de abril hasta agosto. A lo largo de este periodo se producen varias fases de crecimiento separados por entrenudos más o menos evidentes. El primer crecimiento, denominado “preformado”, se inicia en las yemas vegetativas apicales, aproximadamente un mes después de la floración (Ferrerres *et al.*, 2012). Se trata de un crecimiento rápido, de aproximadamente un centímetro diario, de material preformado el año anterior. Este crecimiento cesa a finales de junio o comienzos de julio, con el aumento de las temperaturas. Las yemas de flor se encuentran en las axilas de las hojas de los ramos preformados. El segundo crecimiento se da desde finales de julio o comienzos de agosto, hasta finales de agosto o principio de

septiembre, en función del cultivar y la climatología del año. Es denominado crecimiento “neoformado”, ya que la extensión de los nuevos metámeros no ha pasado un periodo de reposo. Durante los meses de junio y julio, el crecimiento vegetativo es despreciable. Es en este momento cuando se está dando la diferenciación de las yemas de flor y vegetativas del año siguiente.

## **2.4. Ecología del cultivo.**

### **2.4.1. Clima.**

En líneas generales, el pistachero necesita veranos largos y calurosos, así como inviernos fríos o muy fríos. Para una brotación homogénea, y en función de la variedad, las necesidades de horas frío (HF) oscilan entre 700 HF para cultivares tempranos, hasta 1100 HF para cultivares tardíos (Couceiro *et al.*, 2017). Las unidades de calor (UC) necesarias para una correcta maduración de los frutos, oscila entre 3000 UC para cultivares tempranos y 3550 UC para cultivares tardíos. Las unidades de calor son contabilizadas de abril a septiembre.

El pistachero es muy sensible a condiciones de humedad relativa (HR) alta, no recomendado su cultivo en lugares con una HR media superior al 50% en los meses de junio a agosto (Couceiro *et al.*, 2017), ya que la combinación con temperaturas superiores a 18° C causa una fácil y rápida expansión de enfermedades producidas por hongos aéreos.

Otros factores ambientales que afectan al cultivo son las precipitaciones intensas durante la polinización (finales de marzo-principios de abril) que podrían lavar el polen y las heladas primaverales tardías (Couceiro *et al.*, 2017). La flor y el fruto del pistacho son muy sensibles a temperaturas bajo cero, en concreto, la flor aguanta hasta -2,5°C (primera quincena de abril) y el fruto hasta 1,5°C (principios de mayo) (Couceiro *et al.*, 2017).

### **2.4.2. Requerimientos edafológicos**

El pistachero puede ser cultivado en una gran variedad de suelos, siendo especialmente remarcable su tolerancia a suelos alcalinos y a la salinidad. A pesar de esto, su cultivo se da mejor en suelos bien drenados, debido a su intolerancia a situaciones de saturación de suelo, de estructura Franca o Franco arenoso. Suelos poco profundos limitan el crecimiento y la producción del árbol (Couceiro *et al.*, 2017).

## 2.5. Portainjertos o Patrones

Son muchas las especies del género *Pistacia spp.* utilizadas como portainjerto o patrón a nivel mundial. En Irán o Turquía, se utilizan distintas variedades de *Pistacia vera* L., o especies salvajes como *Pistacia mutica* L., *Pistacia khinjuk* L. (Arzani *et al.*, 2013; Ranjbarfordei *et al.*, 2001). En Estados Unidos el portainjerto utilizado es UCB-1 (*Pistacia integerrima* Stewart. x *Pistacia atlantica* Desf.). En las zonas mediterráneas de Europa, *Pistacia terebinthus* L. es el principal portainjerto utilizado, pero también son usadas otras especies como *Pistacia atlantica* Desf. o *Pistacia integerrima* S. (Marino G., 2018).

### 2.5.1. *Pistacia terebinthus* L.

Árbol que crece de manera natural en toda la región mediterránea, extendiéndose por el sur de Europa, norte de África y suroeste asiático. Dentro de la región mediterránea, se desarrolla desde zonas cálidas y a nivel del mar, hasta regiones muy frías y de gran altitud (1600 msnm). En la Península Ibérica se desarrolla principalmente en el piso mesomediterráneo (Couceiro *et al.*, 2017).

Árbol de gran rusticidad, adaptado a suelos pobres, rocosos y de diferentes grados de pH. En estudios realizados en California, se observó que, de los cinco portainjertos estudiados, *Pistacia terebinthus* L. fue el más resistente al frío (Couceiro *et al.*, 2017). Además, en estudios nutricionales, árboles de la variedad Kerman injertados sobre *Pistacia terebinthus* L. mostraron mayores contenidos de zinc y cobre en análisis foliar, lo que se traduce en una mayor eficiencia de absorción de estos dos micronutrientes (Couceiro *et al.*, 2017). En cuanto a resistencia a enfermedades, *Pistacia terebinthus* L. mostró ser más resistente a *Armillaria spp.* que los otros portainjertos estudiados (Ferguson *et al.*, 2016). Las razones que llevaron a su desuso en Estados Unidos fueron su susceptibilidad a verticilosis, su falta de homogeneidad y uniformidad, menor porcentaje de prendimiento del injerto frente a *Pistacia atlantica* o *Pistacia integerrima* y ser menos vigoroso que *Pistacia atlantica* (Ferguson *et al.*, 2016).

### 2.5.2. *Pistacia atlantica* Desf.

Originario del norte de África (Argelia, Libia, Marruecos, Túnez), Islas Canarias (España), Asia Occidental (Chipre, Egipto, Israel, Jordania, Líbano, Siria y Turquía) y Sudeste de Europa (Grecia). Presenta una buena resistencia a la salinidad y a la caliza. Es menos resistente al frío que *Pistacia terebinthus* L., pero

más resistente que UCB-1 (Ferguson *et al.*, 2016; Couceiro *et al.*, 2017). *Pistacia atlantica* es más eficiente que UCB-1 absorbiendo zinc, pero es menos eficiente que *Pistacia terebinthus* absorbiendo cobre (Ferguson *et al.*, 2016). En relación a enfermedades, es muy susceptible a verticilosis (Ferguson *et al.*, 2016), mala resistencia a *Armillaria* y muy buena a *Phytophthora* (Couceiro *et al.*, 2017). Es más vigoroso que *Pistacia terebinthus*, pero menos que UCB-1. Su entrada en producción es un poco más lenta que otros portainjertos (Ferguson *et al.*, 2016).

### 2.5.3. UCB-1

Híbrido resultado de la polinización cerrada de *Pistacia atlantica* D. (hembra) con polen de *Pistacia integerrima* S. (macho). Debido a la diferencia en la época de floración, el polen de *Pistacia integerrima* se recolecta y almacena hasta que las flores femeninas de *Pistacia atlantica* están receptivas. La polinización se realiza en condiciones controladas de invernadero. Las semillas resultantes de esta polinización cerrada son semillas de UCB-1. Al ser un híbrido interespecífico, muestra variabilidad genética en las semillas (Ferguson *et al.*, 2016; Couceiro *et al.*, 2017). Tiene menor resistencia a la salinidad que *Pistacia atlantica* (Ferguson *et al.*, 2016). Presenta la misma eficiencia en la absorción de boro que *Pistacia atlantica* y *Pistacia terebinthus*. Mayor vigor que *Pistacia atlantica* y *Pistacia terebinthus*, los árboles injertados sobre UCB-1 son los más productivos. Resistente a *Verticillium Dhaliae*.

## 2.6. Perspectivas de cambio climático.

El cambio climático está poniendo en riesgo a numerosas áreas de producción del pistacho a nivel internacional. De hecho, en Irán, es uno de los cultivos que más preocupan y está considerado como un cultivo vulnerable, en el que se prevé que la producción puede verse reducida en un 40% con una reducción de la precipitación y de la disponibilidad hídrica para el cultivo (Shahraki *et al.*, 2023). En otra de las principales áreas productoras, en la cuenca mediterránea, se espera que el calentamiento sea un 20% superior al del resto del mundo, con menos precipitaciones y más variables en el tiempo (Lionello & Scaraccia, 2018). Los países mediterráneos han sido identificados como “puntos calientes” del cambio climático, en los que se espera que los fenómenos de calor extremo se incrementen entre un 200-500% (Zachariadis, 2016, Diffenbaugh *et al.*, 2007). Esto afectaría a países como Turquía, España, Túnez, Grecia, Siria, Italia...

Según datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet), se producirá un aumento de las temperaturas máximas anuales de entre 1 y 2°C y 2-3°C en el centro de la Península Ibérica según el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) sea medio o alto respectivamente, llegando en algunas zonas a un aumento de entre 3° y 4° C (Fig. 2.6.1).

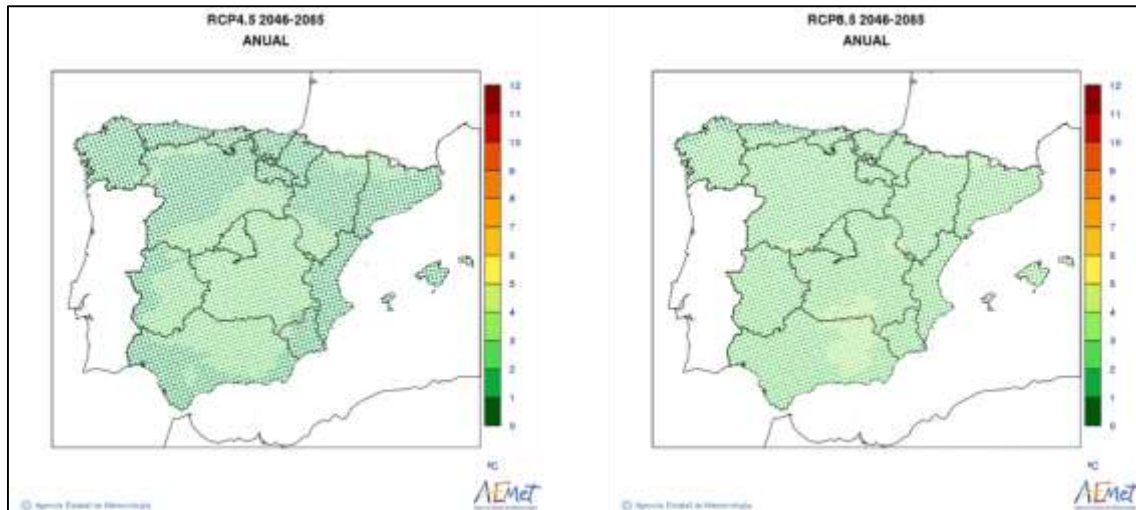


Figura 2.5.3.1.6.1 Aumento de la temperatura máxima anual durante el periodo 2046-2065 en un escenario de emisiones medias de GEI (izquierda) y en un escenario de altas emisiones GEI (derecha). Fuente: AEMet.

En cuanto a las temperaturas mínimas, también se prevé un aumento de entre 1 y 2° C y entre 2° y 3° C en un escenario de emisiones medias o altas emisiones (Fig. 2.6.2).

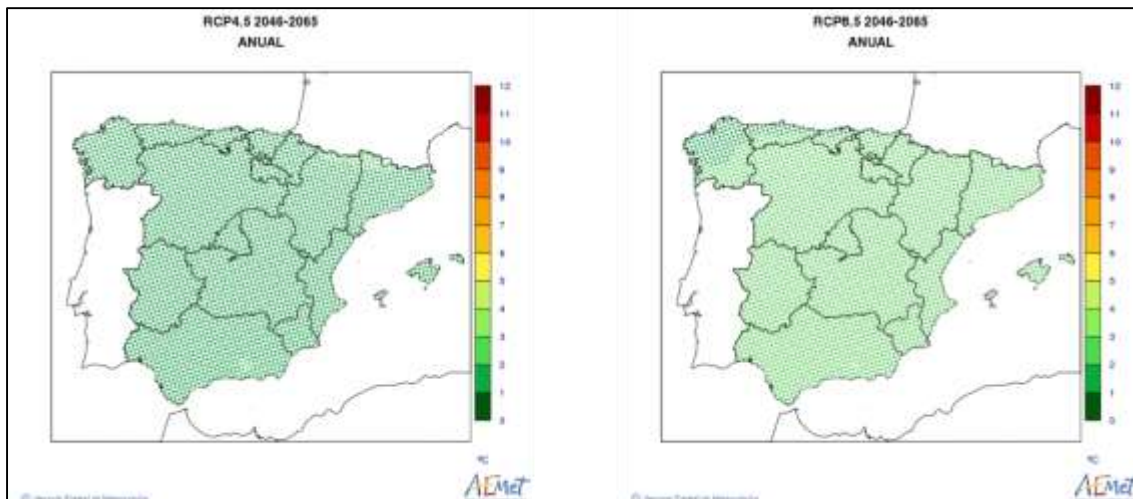


Figura 2.6.2 Aumento de la temperatura mínima anual durante el periodo 2046-2065 en un escenario de emisiones medias de GEI (izquierda) y en un escenario de altas emisiones GEI (derecha). Fuente: AEMet.

El cambio climático tendrá otros efectos a medio plazo en España más allá del aumento de las temperaturas. Se prevé un aumento paulatino de la frecuencia de las sequías meteorológicas que, para 2065, podrían haber duplicado o triplicado su frecuencia, con mayor incidencia en la mitad Sur de la Península Ibérica. La mayor sequedad está influida por el aumento de la temperatura media, pero también por un descenso de las precipitaciones, siendo un descenso de entre el 10-20% en un escenario de emisiones medias GEI y de un 20-30% en un escenario de altas emisiones GEI (Fig. 2.6.3). Además, se incrementarán las lluvias torrenciales.

El aumento de temperaturas producirá mayor evapotranspiración de cultivo, lo que unido a un descenso en pluviometría y mayores restricciones en dotaciones hídricas, las plantas se verán sometidas a mayores niveles de estrés hídrico. Se prevé que para el año 2080 los requerimientos hídricos netos de los cultivos se incrementarán un 25% (Fischer *et al.*, 2007). En España, se esperan incrementos en las necesidades hídricas de entre un 40-250% para el año 2100 según el tipo de cultivo (Savé *et al.*, 2012).

La productividad agrícola se ve más afectada cuando las plantas se cultivan en secano o con aportes hídricos escasos. El uso del riego deficitario ha sido adoptado por muchos países para hacer frente a la escasez de recurso hídrico (Nikolaou *et al.*, 2020).

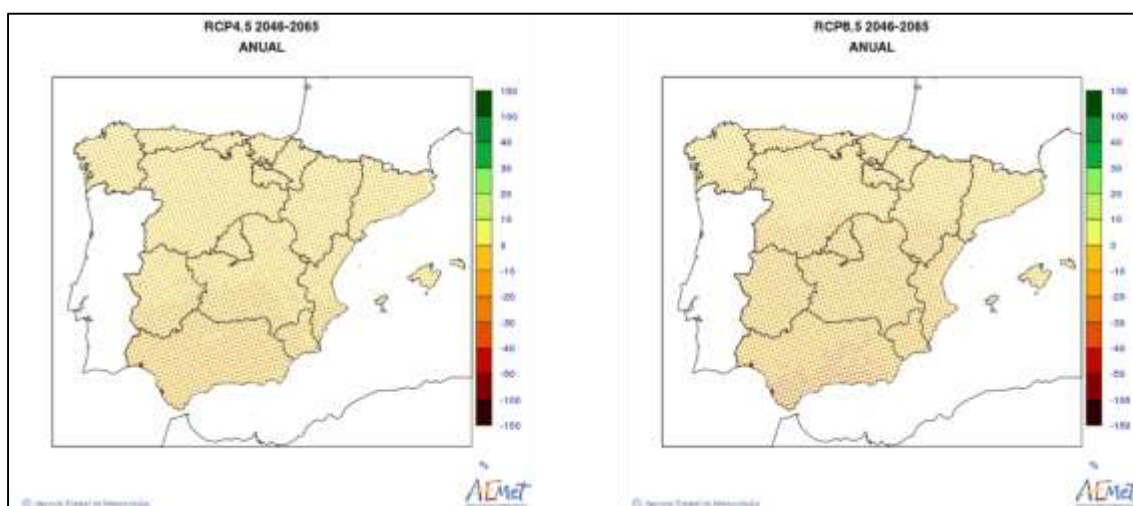


Figura 2.6.3. Variación de la precipitación media anual (%) en España para el periodo 2046-2065 en un escenario de emisiones medias GEI (izquierda) y en un escenario de altas emisiones GEI (Derecha). Fuente: AEMet.

En España, a día de hoy el cultivo en secano ya ocupa el 69% de la superficie, y donde en el 31% restante, el regadío no suele satisfacer la demanda hídrica del cultivo. Además está situada en una de las regiones calientes del cambio climático,

donde se esperan incrementos de la temperatura y por tanto de la evapotranspiración y la demanda hídrica, y donde también se esperan menos y más variables precipitaciones, el estudio de técnicas de optimización del riego, como el riego deficitario controlado y de la caracterización en la respuesta hídrica de los portainjertos es cada vez más importante, no sólo para el sector en España, sino para los principales países productores de la cuenca mediterránea.

## **2.7. Efecto del estrés hídrico en las plantas.**

El déficit hídrico se produce cuando la planta no puede captar agua a un ritmo suficiente para reponer las pérdidas como consecuencia de la demanda evaporativa atmosférica o de la escasez de agua; dicho déficit suele ir seguido de la creación de una situación de estrés hídrico (English y Raja, 1996). La respuesta de los frutales a esta situación es, sin duda, el resultado de un gran número de procesos evolutivos de adaptación al estrés.

Los efectos del estrés hídrico sobre los diferentes procesos morfológicos y fisiológicos de la planta son complejos y están interrelacionados (Fererres *et al.*, 2012). Básicamente, cualquier proceso de la planta puede verse alterado por un estrés hídrico severo y suficientemente prolongado (Hsiao *et al.*, 1975). Las principales consecuencias de la sequía en las plantas son la reducción de la tasa de división y expansión celular, lo que conduce a una reducción del tamaño de las hojas, la elongación del tallo y la proliferación de las raíces. A nivel fisiológico, se produce una alteración del patrón estomático y de las relaciones hídricas y nutricionales de las plantas, lo que limita la eficiencia en el uso del agua y la productividad de los cultivos (Farooq *et al.*, 2009).

El crecimiento es el primer proceso afectado por el estrés hídrico, siendo la tasa de división y expansión celular altamente sensible a este, incluyendo cualquier proceso ligado al desarrollo de un órgano vegetativo o reproductivo (Hsiao *et al.*, 1975).

El crecimiento de las células se ve afectado por el estrés hídrico antes que la división celular (Hsiao, 1973) lo que produce una reducción del tamaño de las hojas y la elongación del tallo (por lo tanto, el crecimiento de la canopia). La limitación del crecimiento y del área foliar se ha considerado como un mecanismo de adaptación al estrés, evitando la planta la pérdida excesiva de agua (reducción de la transpiración) limitando la interceptación de energía.

Otro proceso afectado por el estrés hídrico es el crecimiento radicular. Sin embargo, el crecimiento de las raíces es considerablemente menos sensible al estrés hídrico que el de las hojas, debido sin duda a un desfase de tiempo para experimentar el mismo nivel de estrés que a una mayor resistencia intrínseca de las células de las raíces. Esta diferencia de sensibilidad al estrés hídrico entre las raíces y las partes aéreas produce un aumento de la proporción entre raíces y parte aérea. Este cambio morfológico garantiza en cierta medida un transporte más fácil del agua a través del árbol sometido a estrés hídrico.

La única forma de que un factor ambiental como el agua afecte al crecimiento de la planta es influyendo en el proceso y las condiciones fisiológicas (Kramer, 1983). Las relaciones hídricas tienen sin duda un impacto decisivo como impulsor de dicha respuesta. El contenido hídrico relativo (RWC), el potencial hídrico de la hoja, el potencial osmótico, el potencial de presión y la tasa de transpiración son los principales atributos de las relaciones hídricas de las plantas (Kirkham, 2008) que se ven afectados significativamente bajo déficit hídrico. Entre otras cosas, el déficit hídrico conduce a una reducción del potencial hídrico foliar y de la conductancia estomática (Castel & Fereres, 1982; Girona, 1993). La disminución de la conductancia estomática está generalmente correlacionada con una disminución de la tasa de transpiración, de la absorción de CO<sub>2</sub> y, por tanto, de la fotosíntesis. La conductancia estomática juega un papel significativo en el control de este proceso y frecuentemente es tomada como un indicador del estrés (Marino *et al.*, 2018). Aun así, debe mencionarse que varios estudios afirman que la reducción de fotosíntesis durante el estrés hídrico no está relacionada con el cierre estomático, sino con la disminución de la capacidad intrínseca de fotosíntesis (Azcón-Bieto, *et al.*, 1983; Farquhar & Sharkey, 1982; Osmond *et al.*, 1980; Schulze, 1986). Por tanto, la predicción de la respuesta de la fotosíntesis al estrés hídrico sólo en función de la conductancia estomática debe tomarse con precaución.

La síntesis de compuestos fenólicos es estimulada por estreses bióticos y abióticos, como es el estrés hídrico (Parida, 2004). Dentro de los compuestos fenólicos, se encuentran los flavonoles y las antocianinas. Estos compuestos están presentes en distintas partes de la planta y pueden acumularse en raíces (Wang *et al.*, 2022) y tallos (Singh *et al.*, 1995; Yatsushashi *et al.*, 1982). En los tallos estos compuestos pueden acumularse por acción del estrés hídrico (Dutt *et al.*, 1991) o del frío (Ahmed *et al.*, 2015; Schulz *et al.*, 2015). Flavonoles y antocianinas tienen dos funciones principales para combatir el estrés hídrico, actúan como secuestradores de grupos reactivos oxidantes (ROS) y se acumulan en vacuolas y otros tejidos de

las hojas actuando como osmorreguladores (Chalker-Scott, 1999; Chalker-Scott, 2002).



## 3. Material y métodos

### 3.1. Diseño experimental.

#### 3.1.1. Ensayo 1: Efecto del patrón en el estrés hídrico, parámetros fisiológicos y crecimiento.

El ensayo se realizó entre el 1/7/2020 y el 14/8/2020 en un invernadero de las instalaciones de la finca experimental “El Encin” del IMIDRA en Alcalá de Henares, Madrid, España.

Semillas de los portainjertos *P. terebinthus*, *P. atlantica* y UCB-1 fueron germinadas y trasplantadas a macetas de polietileno de 5 litros. En 2019 fueron injertadas con *P. vera* L. cv. Kerman. En 2020, se seleccionaron 8 plantas injertadas sobre cada uno de los tres patrones y se trasplantaron en macetas de 18 litros con perlita de grano medio (Perlita B-12). Estas plantas se mantuvieron en condiciones controladas de invernadero en un sistema hidropónico con solución Hoagland (Hoagland & Arnold, 1950) durante dos meses. La temperatura y la humedad relativa en el invernadero (día/noche) osciló entre 27/22°C y 49/71% respectivamente, mientras que la intensidad de luz media fue de 1.212,4  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  PAR, con una intensidad máxima diaria de 1.350  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  y una intensidad mínima diaria de 895  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Tras este tiempo, en julio de 2020 se inició el ensayo. Para ello se mantuvieron cuatro plantas injertadas de cada patrón, seleccionadas al azar, bien regadas, y cuatro plantas de cada patrón se sometieron a un potencial osmótico en la solución de fertirrigación de  $\Psi_s = -2,5$  MPa aplicando PEG 6000, a una concentración de según (Burlyn & Kaufman, 1973). El nivel de estrés se mantuvo durante dos semanas. Después de este periodo, al conjunto de plantas que estaban sometidas a estrés se les retiró PEG 6000 de la solución nutritiva y fueron regadas durante otros 14 días solo con solución Hoagland (Fig. 3.1.1.1)

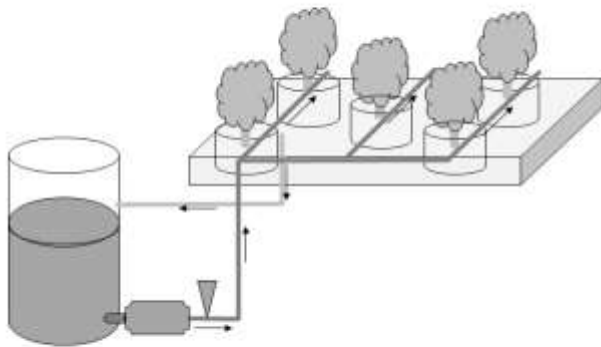


Figura 3.1.1.1 Esquema del diseño del ensayo realizado en invernadero, donde se muestra el bidón con la solución nutritiva, bomba y distribución de las plantas y de goteros (Derecha). Imagen del ensayo (Derecha).

### 3.1.2. Ensayo 2: Efecto del patrón sobre parámetros fisiológicos y producción de plantas en secano y regadío.

El estudio se realizó en la finca “La Chimenea” (40° 03’53” N - 3° 32’49” W), perteneciente al Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) de la Comunidad de Madrid, situada en el Noreste del municipio de Aranjuez (Madrid), a 486 m.s.n.m. El ensayo se realizó en una plantación establecida en enero de 2019. La plantación se realizó con *Pistacia vera* L. cv. Kerman injertada en vivero sobre los patrones *Pistacia terebinthus* L., *Pistacia atlantica* Desf. y UCB-1, adquirida en Viveros Zuaime (Caniles, Granada) de un año de edad. La plantación se realizó con un marco de 7x6 m (238 plantas ha<sup>-1</sup>). Se plantaron 4 líneas de cada uno de los patrones estudiados con 20 plantas cada línea. La variedad elegida de machos fue Peter, y su disposición fue de un macho cada ocho hembras. El ensayo se llevó a cabo durante los años 2021 y 2022. Se estudiaron las respuestas de la variedad Kerman a los diferentes portainjertos y al manejo (secano vs. Regadío). Para ello se evaluaron los efectos sobre el crecimiento, sobre los parámetros fotosintéticos, el nivel de clorofila y polifenoles en hoja y el potencial hídrico y la producción (2022).

### 3.1.3. Ensayo 3: Efecto en la producción y en la calidad de la producción del RDI en árboles adultos de pistacho.

El ensayo tuvo lugar entre los años 2017 y 2020, en una plantación de pistachos de 1 ha con orientación Norte-Sur (Figura 3.1.3.1). La parcela forma parte de la finca de experimentación agraria “La Isla”, en Arganda del Rey (Madrid), perteneciente al Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDRA). Las coordenadas geográficas de la plantación son 40.3139777 N – 3.499589W y se encuentra a 532 m.s.n.m.



Figura 3.1.3.1 Vista aérea de la plantación de pistacho situada en la Finca “La Isla”, Arganda del Rey, Madrid, España.

El ensayo se desarrolló en una plantación realizada en el año 1999 de árboles de *Pistacia vera* L. cv. Kerman injertados sobre *Pistacia terebinthus* L. El año previo a comenzar el ensayo (2016), todos los árboles fueron regados con la misma cantidad de agua.

El diseño experimental fue en bloques al azar, con tres bloques en los que estaban repartidos al azar cada uno de los cuatro tratamientos estudiados, un tratamiento control y tres tratamientos en los que se realizó riego deficitario controlado. Los tratamientos de riego estaban diferenciados entre sí por el umbral de potencial hídrico de tallo medido a mediodía solar en las diferentes fases de desarrollo del fruto.

Las fases del desarrollo del fruto tomadas en cuenta para implementar el Riego Deficitario Controlado fueron las descritas por Goldhammer (1995): Fase I desde cuajado hasta el final del crecimiento del fruto (cuando el pericarpio adquiere su

tamaño máximo), fase II, desde tamaño máximo del fruto hasta inicio de crecimiento de la semilla (coincide con el endurecimiento de la cascara) y fase III, desde el inicio del crecimiento de la semilla hasta cosecha. La fase II de crecimiento del fruto ha sido sugerida como la más tolerante al estrés hídrico. Por tanto, es en esta fase en la que se realiza el déficit hídrico controlado. En cada bloque experimental, se seleccionaron los árboles centrales del bloque, rodeados por árboles con el mismo régimen hídrico.

## **3.2. Características edáficas**

### **3.2.1. Ensayo 2: Efecto del patrón sobre parámetros fisiológicos y producción de plantas en secano y regadío.**

La parcela donde se realizó la plantación se sitúa junto al Canal de la Cola Alta de Aranjuez, en una terraza fluvial del río Tajo. Se asienta sobre materiales cuaternarios, entre los que destacan dos tipos de limos, unos limos rosados con cantos, que corresponden a unos abanicos aluviales, y unos limos pardos con arenas y gravas.

Se realizó una calicata en el año 2020 en una parcela anexa que permitió diferenciar cuatro horizontes de suelo (Figura 3.2.1.1). Un primer horizonte de laboreo de 25 cm de profundidad, un segundo horizonte B entre los 26 y los 55 cm, un tercer horizonte B, desde los 56 a los 70 cm, diferenciado del anterior por una mayor presencia de carbonatos y un horizonte C, entre los 70 y los 135 cm con abundante carbonato cálcico. En todos los horizontes se aprecian raíces, siendo menos abundantes en el horizonte C. El horizonte superficial tiene una textura franco-arenosa a franco-arcillosa-arenosa, el segundo horizonte una textura arenosa franca, el tercero y cuarto una textura franco-arenosa.



Figura 3.2.1.1 Perfil del Suelo adyacente a la plantación de pistachos. El horizonte Ap de la parcela experimental mostró un pH básico ( $\text{pH} = 8,3$ ). La conductividad eléctrica (CE) fue de  $0,50 \text{ dS m}^{-1}$ . El contenido de materia orgánica medio fue del 1,8% (Tabla 3.2.2.1).

Tabla 3.2.1.1 Resultados analíticos de una muestra de suelo del horizonte superficial (La Chimenea-Ap)

Parámetros	La Chimenea Ap
pH	8,3
CE (dS/m)	0,50
Carbonatos (%)	13,9
M.O. (%)	1,8
P (mg/kg)	28
Ca (mg/Kg)	2664
Mg (mg/Kg)	307
Na (mg/Kg)	54
K (mg/kg)	364
Arcilla (%)	23
Limo (%)	22
Arena (%)	55

### 3.2.2. Ensayo 3: Estrategias de RDC

Se realizaron dos calicatas en los extremos diagonales de la plantación, una en el extremo Noroeste y otra en el extremo Sureste (Figura 3.2.2.1). Los resultados de ambas calicatas se encuentran en la tabla 3.3.2.1. El suelo de la parcela experimental fue ligeramente alcalino ( $\text{pH} = 7,9$ ), con una profundidad superior a 2 m y una textura franca. La conductividad eléctrica (CE) fue de  $0,2 \text{ mS m}^{-1}$  en los primeros 35 cm de profundidad y de  $0,8 \text{ mS m}^{-1}$  a partir de los 35 cm de profundidad. El contenido de materia orgánica medio fue el 0,74%. La capacidad de intercambio catiónico fue de  $0,07 \text{ mol kg}^{-1}$  en los primeros 35 cm de suelo y de  $0,04 \text{ mol kg}^{-1}$  de los 35 cm de profundidad en adelante. El contenido de agua volumétrico a capacidad de campo fue de 29% y el punto de marchitez permanente del 8% para los primeros 35 cm de suelo y de 25% y 7% respectivamente para más de 35 cm de profundidad.



Figura 3.2.2.1 Calicatas realizadas en la plantación experimental de pistachos de “La Isla”, en Arganda del Rey. En el panel de la izquierda está la calicata realizada en el extremo sureste y en el panel de la derecha, la calicata realizada en el extremo noroeste.

Tabla 3.2.2.1 Resultados de las calicatas realizadas en la plantación experimental de pistachos de “La Isla” en Arganda del Rey.

Calicata NE	IS 11	IS 12	IS 13	IS 14	IS 15
Arena (%)	36,1	39,3	56,8	40,8	64,5
Limo (%)	47,5	44,6	31,8	45,7	24
Arcilla (%)	16,4	16,2	11,4	13,5	11,5
MO%	1,30	0,94	0,42	0,68	0,35
CO%	0,76	0,55	0,24	0,39	0,20
Carbonatos totales (%)	5,3	5,39	5,8	7,72	6,25
pH (1:2,5)	7,59	7,97	7,95	8,14	10,2
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	277	305	834	2310	928
N total (%)	8,20%	6,70%	2,60%	3,80%	1,60%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	47,75	26,34	4,48	4,07	4,15
Calicata SO	IS 21	IS 22	IS 23	IS 24	IS 25
Arena (%)	37,7	37,4	47,4	50,5	51,9
Limo (%)	43,4	45,8	38,8	41,6	29,5
Arcilla (%)	18,9	16,9	13,5	7,9	18,6
MO%	1,23	1,00	0,62	0,49	0,34
CO%	0,72	0,58	0,36	0,29	0,20
Carbonatos totales	4,50%	5%	5%	6,30%	5,24%
pH (1:2,5)	8,28	6,51	7,83	5,76	7,72
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	238	563	1073	2370	1390
N total (%)	0,074	0,063	0,039	0,036	0,025
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	28,62	14,98	3,9	3,69	2,82

### 3.3. Características climáticas

#### 3.3.1. Ensayo 2:

La caracterización climática de la parcela se realizó con datos obtenidos a partir de la información climática suministrada por el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) y de la información cedida por la Agencia Estatal de Meteorología del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, empleando una estación meteorológica situadas a 8 Km, en las coordenadas 40° 02'29" N - 3° 37'49" W y 40° 02'29" N - 3° 37'49" W a una altitud de 486 m.s.n.m. Los datos mostrados en la Figura 3.3.1.1, son un histórico entre los años 2004 y 2022.

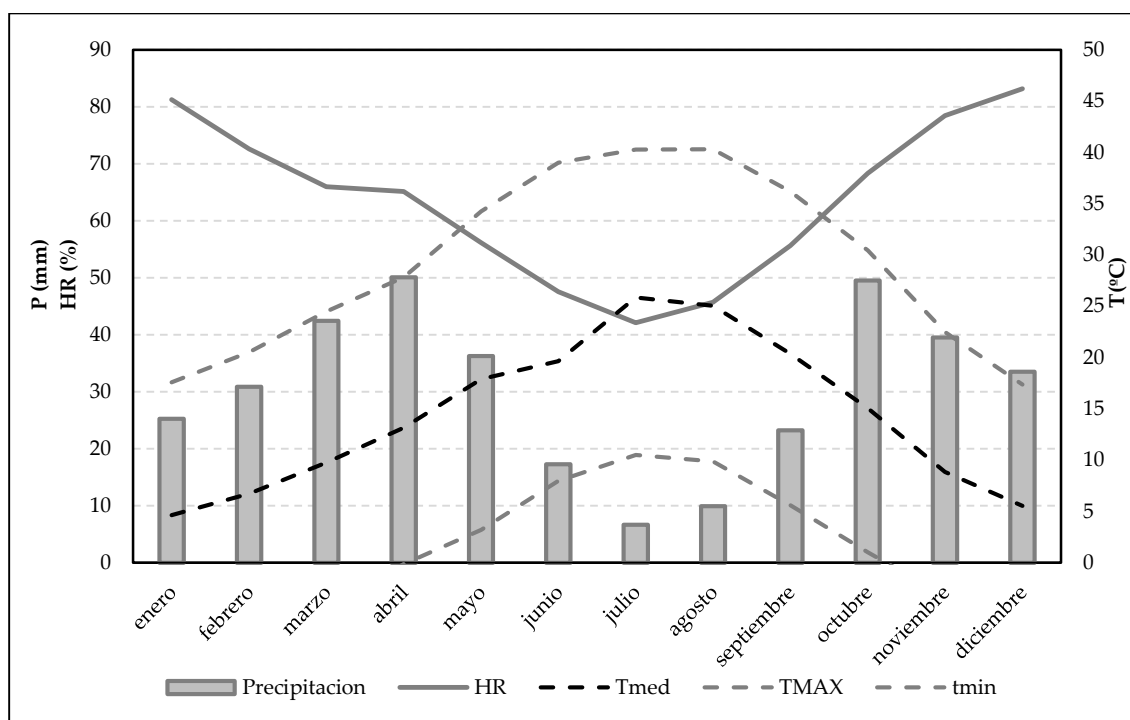


Figura 3.3.1.1 Climograma de la Finca Experimental “La Chimenea”, en Aranjuez (Madrid) obtenido a partir de los datos meteorológicos recogidos entre 2004 y 2022: Precipitación media (P), Humedad Relativa (HR), Temperatura media (Tmed), Temperatura mínima (tmin), Temperatura máxima (TMAX).

La figura 3.3.3.1 muestra la media mensual de las temperaturas media (Tmed), máxima absoluta (TMAX) y mínima absoluta (tmin) la humedad relativa y la precipitación. La precipitación media anual es de 364 mm, la temperatura media anual es 14,6 °C. El mes más caluroso es Julio, con una temperatura media de máximas de 40,9 °C y el más frío enero, con una temperatura media de mínimas de -7,9 °C. Durante los cinco años de estudio, la precipitación media anual fue de

356 mm, 8 mm por debajo de la media (Tabla 3.3.3.1), siendo el año 2019 el más seco (317 mm) y el año 2021 el más lluvioso (371 mm). La temperatura media anual ha sido 0,8 °C mayor que la media del histórico de datos (Tabla 3.3.3.1). La evapotranspiración de referencia anual, aplicando la ecuación de Penman-Monteith, fue de 1.097 mm. Las precipitaciones ocurren principalmente en otoño, invierno y primavera, caracterizado por veranos secos. La pluviometría media anual es de 364 mm (serie 2004-2022). La humedad relativa media anual es del 63%, siendo máxima (83%) en el mes de diciembre y mínima (42%) en el mes de julio.

De acuerdo con el atlas climático español y siguiendo la clasificación climática Köppen-Geiger (Köppen, 1936), el clima del área es “Csa”. Esta clasificación distingue tres niveles. El tipo “C” se refiere a climas templados en los que la temperatura media del mes más frío oscila entre los 0 y los 18 C. “S” hace referencia a que hay un período seco y que éste ocurre en verano y la “a” a que la temperatura media en el mes más cálido es por encima de los 22° C. Este tipo de clima se da en aproximadamente el 40% de la Península Ibérica. Se localiza en la meseta sur-central y en la región de la costa mediterránea, con excepción de la zona más árida situada en el sureste.

Tabla 3.3.1.1 Precipitación (P) y Evapotranspiración potencial según Penman-Monteith (ET<sub>0</sub>) anual desde el inicio de la plantación hasta la actualidad.

Año	P (mm)	T (°C)	ET <sub>0</sub> (mm)
2019	317	15,1	1.147
2020	371	14,9	1.053
2021	395	14,7	1.088
2022	344	15,9	1.096
2023	355	16,6	1.102
Promedio	356	15,4	1.097

### 3.3.2. Ensayo 3: Estrategias de RDC

La caracterización climática de la parcela se realizó con datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Los datos se obtuvieron de una estación climática cercana a la parcela, situada en las coordenadas 40.3139777 N – 3.499589W y a una altitud de 532 m.s.n.m. Los datos mostrados en la Figura 3.3.2.1, son un histórico entre los años 2003 y 2015. La figura muestra la media mensual de temperatura (media, máxima y mínima), humedad relativa y precipitación. La temperatura media anual es 14,3°C. Durante los tres años de estudio, la temperatura media anual ha sido 0,5°C mayor que la media del histórico de datos. El mes más caluroso es Julio, con una temperatura máxima media de 40,9°C y el más frío enero, con una temperatura mínima media de -7,9°C.

De acuerdo con el atlas climático español y siguiendo la clasificación climática Köppen-Geiger (Köppen, 1936), el clima del área es “Csa”. Esta clasificación distingue tres niveles. El tipo “C” se refiere a climas templados en los que la temperatura media del mes más frío oscila entre los 0 y los 18 °C. “Cs” hace referencia a un periodo seco que ocurre durante el verano y la “a” a que la temperatura media en el mes más cálido es por encima de los 22 °C. Este tipo de clima se da en aproximadamente el 40% de la Península Ibérica. Se localiza en la meseta sur-central y en la región de la costa mediterránea, con excepción de la zona más árida situada en el sureste.

Las precipitaciones ocurren principalmente en otoño, invierno y primavera, caracterizado por veranos secos. La pluviometría media anual es de 473 mm (serie 2004-2016).

La humedad relativa media anual es del 63%, siendo la máxima humedad relativa del 83% en el mes de diciembre y la mínima del 42% en el mes de julio.

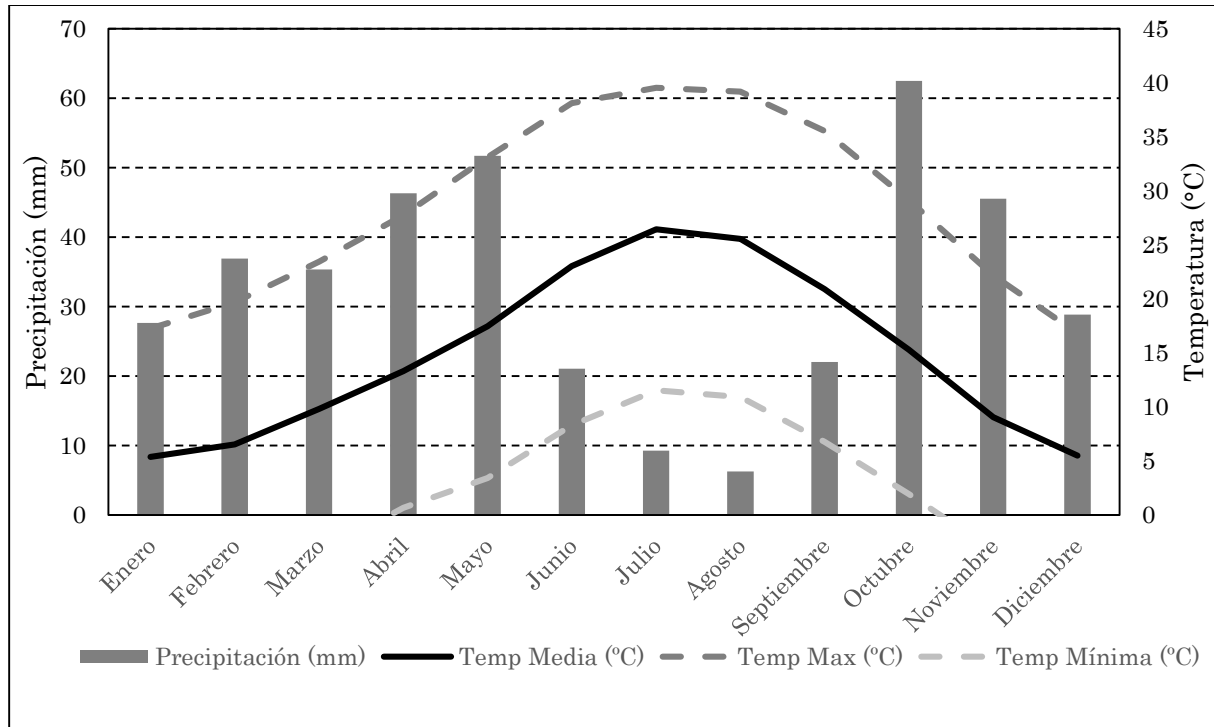


Figura 3.3.2.1 Climograma de la Finca Experimental “La Isla” (Arganda del Rey) obtenido con valores de la estación meteorológica SIAR durante el periodo 2004-2016: Precipitación media (P), Humedad Relativa (HR), Temperatura media (Temp med), Temperatura mínima (Temp min), Temperatura máxima (Temp Max).

### 3.4. Material Vegetal.

#### Cultivar

El cultivar utilizado en los tres ensayos fue Kerman. Esta variedad ha sido, con mucha diferencia, el más utilizado en España. Sigue siendo protagonista en muchas de las nuevas plantaciones, pero en la actualidad comparte el protagonismo con otras variedades como Sirora. Kerman fue seleccionado en 1952, después de haber sido recogido por el botánico Whitehouse en el valle de Kerman (Irán) en 1929 y ensayado en la estación experimental de Chico perteneciente al USDA (Whitehouse, 1957). Es un cultivar con un vigor medio o moderado, muy productivo con alto índice de vecería. Tiene unos requerimientos altos tanto de unidades de calor ( $UC = 3550$ ) como de horas frío ( $HF = 1000 HF$ ) con respecto a otras variedades. El porcentaje de frutos abiertos ronda el 60 % y tiene alrededor del 20 % de fruto vacío. Su rendimiento en condiciones de regadío en California oscila entre  $2200 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $3000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

#### Patrones

En el ensayo 1 y 2 se usaron los tres patrones más utilizados en España, *Pistacia terebinthus* L., *Pistacia atlantica* Desf. Y el híbrido UCB-1. En el ensayo 3, el patrón utilizado fue *Pistacia terebinthus* L. A continuación, se describen dichos patrones.

Se empleó *Pistacia terebinthus* L. (PT), especie que crece de manera natural en toda la región mediterránea, extendiéndose por el sur de Europa, norte de África y suroeste asiático. Dentro de la región mediterránea, se desarrolla desde zonas cálidas y a nivel del mar, hasta regiones muy frías y de gran altitud (1600 msnm). En la Península Ibérica se desarrolla principalmente en el piso mesomediterráneo (Couceiro *et al.*, 2017). Es una especie de gran rusticidad, adaptado a suelos pobres, rocosos y de diferentes grados de pH. En estudios realizados en California, se observó que, de los cinco portainjertos estudiados, *Pistacia terebinthus* L. fue el más resistente al frío. Además, en estudios nutricionales, árboles de la variedad Kerman injertados sobre *Pistacia terebinthus* L. mostraron mayores contenidos de zinc y cobre en análisis foliar, lo que se traduce en una mayor eficiencia de absorción de estos dos micronutrientes. En cuanto a resistencia a enfermedades, *Pistacia terebinthus* L. mostró ser más resistente a *Armillaria* spp. que los otros portainjertos estudiados (Ferguson *et al.*, 2016). Las razones que llevaron a su desuso en Estados Unidos fueron su susceptibilidad a verticilosis, su falta de homogeneidad y uniformidad, menor porcentaje de prendimiento del injerto frente a *Pistacia atlantica* o *Pistacia integerrima* y ser menos vigoroso que *Pistacia atlantica* (Ferguson *et al.*, 2016).

También se empleó *Pistacia atlantica* Desf. (PA), especie originaria del norte de África (Argelia, Libia, Marruecos, Túnez), Islas Canarias (España), Asia Occidental (Chipre, Egipto, Israel, Jordania, Líbano, Siria y Turquía) y Sudeste de Europa (Grecia). Presenta una buena resistencia a la salinidad y a la caliza. Es menos resistente al frío que *Pistacia terebinthus* L., pero más resistente que UCB-1 (Couceiro *et al.* 2017; Ferguson *et al.*, 2016). *Pistacia atlantica* es más eficiente que UCB-1 absorbiendo zinc, pero es menos eficiente que *Pistacia terebinthus* absorbiendo cobre (Ferguson *et al.*, 2016). En relación a enfermedades, es muy susceptible a verticilosis (Ferguson *et al.*, 2016), mala resistencia a armilaria y muy buena a phytophthora (Couceiro *et al.*, 2017). Es más vigoroso que *Pistacia terebinthus*, pero menos que UCB-1. Su entrada en producción es un poco más lenta que otros portainjertos (Ferguson *et al.*, 2016).

Por último, se empleó UCB-1, un híbrido resultado de la polinización cerrada de *Pistacia atlantica* D. (hembra) con polen de *Pistacia integerrima* S. (macho). Debido a la diferencia en la época de floración, el polen de *Pistacia integerrima* se

recolecta y almacena hasta que las flores femeninas de *Pistacia atlantica* están receptivas. La polinización se realiza en condiciones controladas de invernadero. Las semillas resultantes de esta polinización cerrada son semillas de UCB-1. Al ser un híbrido interespecífico, muestra variabilidad genética en las semillas (Couceiro *et al.*, 2017; Ferguson *et al.*, 2016). Tiene menor resistencia a la salinidad que *Pistacia atlantica* (Ferguson *et al.*, 2016). Presenta la misma eficiencia en la absorción de Boro que *Pistacia atlantica* y *Pistacia terebinthus*. Mayor vigor que *Pistacia atlantica* y *Pistacia terebinthus*, los árboles injertados sobre UCB-1 son los más productivos.

### **3.5. Régimen hídrico.**

#### **3.5.1. Ensayo 2**

Se instalaron dos ramales de riego a cada lado de la línea de plantación, con 4 goteros por árbol, pinchados en el ramal, de 4 l hora<sup>-1</sup>, situadas a medio metro cada una de la línea de plantación. Entre el árbol 10 y 11 de cada línea, en sendos ramales de riego, se instalaron llaves para poder cerrar el riego, dividiendo así la zona de secano y la zona de regadío. Las llaves se cerraban todos los años de estudio, justo después de aplicar el fertilizante, antes de comenzar la campaña de riego. El fertilizante se aplicó a mediados de abril, aportando un riego de 320 litros/árbol. Se seleccionaron al azar un total diez árboles de cada patrón estudiado, cinco en la zona de regadío y cinco en la zona de secano. Las plantas regadas, recibían una cantidad de agua igual a la ET<sub>c</sub> semanal, calculada con los datos de la estación meteorológica utilizada para el análisis de los datos climáticos.

#### **3.5.2. Ensayo 3**

Se instalaron dos ramales de riego a cada lado de la línea de plantación, con 8 goteros por árbol, pinchados en el ramal, de 4 l hora<sup>-1</sup>, situadas a un metro cada una de la línea de plantación.

Durante la época de riego, las plantas del tratamiento control se regaron reponiendo la ET<sub>c</sub> de la semana anterior. La ET<sub>c</sub> fue estimada de acuerdo con la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), calculada de acuerdo a la ecuación de Penman-Monteith (Allan *et al.*, 1998), un coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) basado en cada periodo de crecimiento del fruto (Memmi *et al.* 2016) y un coeficiente corrector (K<sub>r</sub>)

basado en el marco de plantación y el tamaño de copa (Ferreres & Goldhammer, 1990) (Tabla 3.2.5.1). El riego comenzó cuando los potenciales del tratamiento control bajaron del umbral  $-1,1$  MPa, potencial hídrico definido por Memmi *et al.* 2016 como límite de estrés hídrico. Además del tratamiento control, se testaron tres tratamientos más, T1, T2 y T3, diferenciados entre sí por los umbrales de potencial hídrico de tallo en cada una de las fases de desarrollo del fruto. Los umbrales para cada tratamiento fueron los siguientes:

- T0: Se regaba reponiendo la ETc de la semana anterior. Si el potencial hídrico era menor de  $-1,1$  MPa se incrementaba un porcentaje al riego:
- T1: Durante la fase II de desarrollo del fruto, su potencial umbral era  $-2$  MPa y durante la fase III  $-1,5$  MPa.
- T2: Fue igual que T1, pero se amplió 15 días el plazo de umbral  $-2$  MPa al darse por concluida la fase II.
- T3: Durante la fase II de desarrollo de fruto, su potencial umbral fue  $-2,5$  MPa. Una vez finalizada la fase II, se mantuvo este umbral durante 15 días más. Durante la fase III de desarrollo del fruto su potencial umbral fue  $-2$ MPa.

El riego de los tratamientos comenzó cuando el valor medio del potencial hídrico de tallo para cada tratamiento bajaba por debajo de los valores umbral establecidos. El riego de T0 se basaba en la reposición de la ETc de la semana anterior. Además, cada aumento o disminución del suministro de agua de riego se programó según el porcentaje de la diferencia derivada entre el potencial hídrico medido y el umbral establecido para esa etapa:

- Si la desviación del potencial era menor de un 10%, la variación en el riego era de  $0,25$  mm  $\text{dia}^{-1}$ .
- Si la desviación del potencial era entre un 10-20 %, la variación en el riego era de  $0,5$  mm  $\text{dia}^{-1}$ .
- Si la desviación era entre 20-30%, la variación en el riego era de  $1$ mm  $\text{dia}^{-1}$ .
- Si la desviación era mayor del 30%, la variación en el riego era de  $2$  mm  $\text{dia}^{-1}$ .

Este planteamiento se aplicó en todos los tratamientos de riego, en función de sus umbrales de potencial establecidos para cada fase de desarrollo del fruto.

Tabla 3.5.2.1. Coeficiente corrector ( $K_r$ ) y coeficiente de cultivo utilizados para calcular la evapotranspiración de cultivo.

Mes	$K_r$	$K_c$
Enero	0,04409	0
Febrero	0,04409	0
Marzo	0,04409	0
Abril	0,04409	0
Mayo	0,04409	0,89
Junio	0,04409	0,89
1-17 Julio	0,04409	0,89
18-31 julio	0,04409	0,93
Agosto	0,04409	0,93
Septiembre	0,04409	0,93
Octubre	0,04409	0,93
Noviembre	0,04409	0
Diciembre	0,04409	0

## 3.6. Estado fisiológico

### 3.6.1. Potencial hídrico.

El potencial hídrico de tallo se midió al mediodía solar utilizando una cámara de presión PMS 600 (PMS Instrument company, Albany, USA) utilizando gas nitrógeno para la presurización (Kramer & Boyer, 1995). Se tapó una hoja totalmente expandida de cada planta con papel de aluminio una hora antes de realizar la medida, parando la transpiración y permitiendo a la hoja alcanzar el equilibrio con el potencial hídrico del tallo (Begg & Turner, 1970). Debido a la dificultad en la determinación del potencial hídrico del tallo en el pistachero a causa de la exudación de resina, un trozo de papel se colocó justo encima del corte del pecíolo para facilitar la medida, ya que el papel no se humedece con la resina y sí lo hace con la solución xilemática. En el Ensayo 1, se midió al inicio del período de estrés (24 horas después del inicio), al finalizar el período de estrés (14 días) y al finalizar el período de recuperación (14 días después de finalizar el período de estrés). En el ensayo 2, el potencial hídrico se midió 70 días después de cortar el riego y 84 días después de cortar el riego, en una hoja de cada uno de los cinco árboles por tratamiento (regadío y secano) coincidiendo con el fin del llenado del fruto e inicio del crecimiento “noeformado”. Por último, en el ensayo 3, el potencial

hídrico se midió semanalmente desde que la hoja estuvo completamente desplegada, aproximadamente 50 días después de la plena floración (DAB) hasta la cosecha. Parámetros fotosintéticos e intercambio gaseoso.

### **3.6.2. Medidas de intercambio gaseoso y fotosíntesis.**

En el Ensayo1, las medidas fotosintéticas se realizaron usando un analizador infrarrojo de gas de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (LI-COR 6400, LI-COR Inc., Lincon, USA), en cuatro repeticiones de cada patrón en condiciones control y en condiciones de estrés. La tasa fotosintética (A), la conductancia estomática (g<sub>s</sub>), la concentración de CO<sub>2</sub> subestomática (C<sub>i</sub>) y la transpiración de la hoja (E) fueron medidas tras 24 h del inicio del estrés, tras 14 días de estrés y tras 14 días de recuperación del estrés. Con los datos medidos, además se calculó la eficacia de carboxilación (A/C<sub>i</sub>), la eficiencia intrínseca en el uso del agua (A/ g<sub>s</sub>) y la eficiencia en el uso del agua (WUE) fue estimada como un cociente entre A/E.

En el ensayo 2, en el año 2022, se midió la conductancia estomática y la evapotranspiración con la sonda LI-COR 600 (LI-COR Biosciences, 2020) al mediodía solar al final del período de estrés (25 de agosto). Se realizaron cinco medidas por planta, siendo el valor medio el utilizado para la medida de cada planta. Previa a la medida, fue necesaria la calibración del aparato, realizando una medida “en blanco”, es decir, sin ninguna hoja en el interior del aparato. Las medidas se realizaron en hojas adultas, totalmente expandidas, sanas y expuestas al sol en la base del ramo.

### **3.7. Determinación de clorofila y polifenoles.**

En el ensayo 1 la medida de clorofilas (Clor), flavonoles (Flav) y antocianinas (Ant) se realizaron en 4 hojas de cada una de las plantas con la pinza Dualex 4 Scientific (FORCE-A, Orsay, France). Las medidas se tomaron en la cara adaxial de los folíolos terminales de las hojas, con las que se calcularon la concentración de clorofilas y antocianinas. Con la suma de la medida de la cara adaxial y abaxial se calculó la concentración en flavonoles (Cerovic, 2012). Las fechas seleccionadas para la realización de dichas medidas fueron para el ensayo 1 el inicio del periodo de estrés, final del periodo de estrés y final del periodo de recuperación. En el ensayo 2 se realizaron 40 medidas por planta, 20 en la cara adaxial y 20 en la cara

abaxial, de folíolos subterminales de hojas maduras, de cada una de las plantas en las fechas ya citadas. (5 y 25 de agosto).

En el ensayo 3 se realizaron 40 medidas por planta en la cara adaxial de 40 folíolos subterminales de cada una de las plantas en 5 fechas correspondientes a Fecha 1: final fase I, Fecha 2: final fase II, Fecha 3: quince días después de finalizar la fase II, Fecha 4: cuarenta días después de finalizar la fase II y fecha 5: cosecha.

### **3.8. Crecimiento y Biomasa.**

#### **3.8.1. Ensayo 1.**

Al finalizar el ensayo se cortó todo el crecimiento de las plantas durante el ensayo. Se pesó en fresco la biomasa total y posteriormente se separó en ramas y hojas, tomando la biomasa fresca de ambas. Se realizaron medidas del área foliar de cada planta. Se metió a estufa a 72° C hasta peso constante. Se tomaron los pesos secos de hojas, ramas y biomasa seca total.

#### **3.8.2. Ensayo 2**

Desde el año 2019 hasta el año 2023 se estudió el efecto del portainjerto y el estrés hídrico sobre la evolución del diámetro del portainjerto y de la variedad. Para ello, en cada medida, se determinaron con un calibre digital dos diámetros perpendiculares entre sí, cinco centímetros por debajo del injerto y cinco centímetros por encima. Las medidas se realizaron al final de campaña, cuando las plantas habían tirado la hoja (noviembre).

Durante los años 2022 y 2023 se estudió además la longitud de los brotes del año, el diámetro de tronco a un metro de altura, área de la proyección de la copa y volumen de copa en el momento de máximo estrés hídrico, coincidiendo con las medidas de la fisiología y del potencial hídrico. Para determinar la longitud de los brotes del año se seleccionaron tres brotes por planta, distribuidos aleatoriamente y se midió su longitud desde el ápice hasta el inicio del crecimiento del año. La media de las tres medidas se utilizó como valor de la planta. El diámetro del portainjerto y el diámetro de la variedad a un metro de altura se realizó con la misma metodología descrita anteriormente. El área ortogonal y el volumen de copa se midieron con un dron de la empresa UTW, que realizó dos vuelos con la aeronave DJI Matrice 300 y la cámara LiDAR L1 (Figura 3.8.2.1) siendo la trayectoria para seguir como se muestra en la Figura 3.8.2.2. La cámara LiDAR es capaz de

penetrar por el dosel vegetativo por lo que no es necesario llevar a cabo el vuelo en cuadrícula. La cámara se coloca de forma cenital, siendo la velocidad de vuelo baja (2 m/s) y la altura de 30 m/AED (About Elevation Data) para obtener la información de la manera óptima. Una vez llevado a cabo el vuelo, las imágenes son procesadas en el software DJI Terra y el software CloudCompare, que permitieron diferenciar las copas de los árboles y se pudo calcular el volumen y área proyectada a través de un script en Python.



Figura 3.8.2.1 Aeronave DJI Matrice 300 con cámara LiDAR L1 utilizada por la empresa UTW para la determinación de la superficie y del volumen de copa.

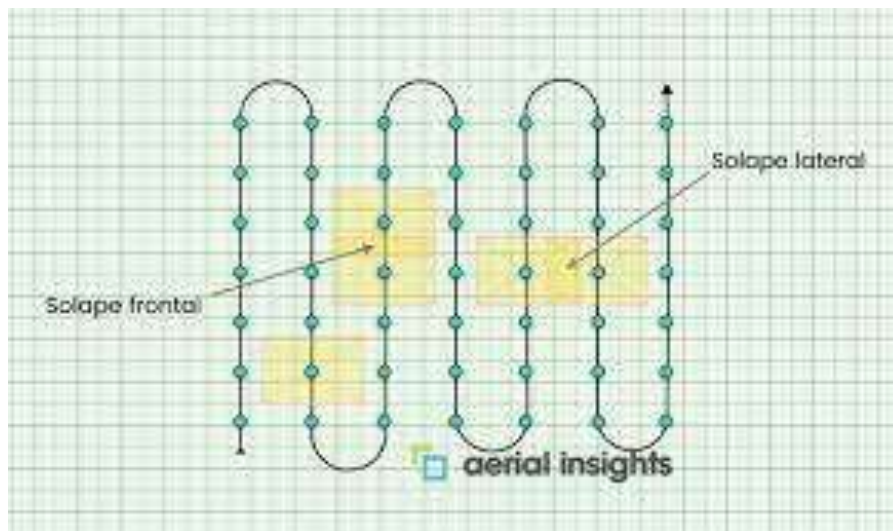


Figura 3.8.2.2 Trayectoria de vuelo realizada con la aeronave DJI Matrice 300 con cámara LiDAR L1.

### 3.8.3. Ensayo 3.

Para la medida del crecimiento se realizó un vuelo con dron a final de la campaña del año 2019 sobre la parcela situada en la finca “La Isla” (Arganda del Rey) siguiendo la misma metodología descrita en el apartado anterior (3.8.2).

## **3.9. Producción**

### **3.9.1. Ensayo 2**

En el año 2022 se evaluó el efecto del portainjerto y del régimen hídrico sobre la cantidad y calidad de la cosecha. Para estimar la cantidad de cosecha, se vibró cada árbol con un vibrador de mano, colocando tendales bajo el árbol control de cada uno de los tratamientos por separado. Se pesó la cosecha de cada árbol antes y después de pelar. Con la media de los ejemplares de cada tratamiento se obtuvo la cosecha por árbol ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ). Después, se tomó una muestra de aproximadamente cien pistachos de cada árbol. De cada muestra, se separaron los pistachos abiertos de los cerrados. Se pesaron en conjunto los pistachos abiertos y los pistachos cerrados, obteniéndose el porcentaje en peso de pistacho abierto. Se abrieron todos los pistachos cerrados con un alicate, se separó los pistachos cerrados llenos y cerrados vacíos. Se pesaron las cáscaras de los pistachos vacíos, obteniéndose el porcentaje de pistachos cerrados llenos y pistachos cerrados vacíos. Cada muestra y submuestra se pusieron a secar por separado en horno con ventilación a  $80^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante. Finalmente fueron pesados de nuevo para la obtención de los pesos secos.

### **3.9.2. Ensayo 3**

Durante los 4 años de estudio, se evaluó el efecto de los tratamientos de riego deficitario controlado frente al control en la producción y en la calidad de la cosecha. Para estimar la cantidad de cosecha, se vibró cada árbol control de cada uno de los tratamientos por separado. Se pesó la cosecha de cada árbol antes y después de pelar. Con la media de los individuos de cada tratamiento se obtuvo la cosecha por árbol ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ). Después, se tomó una muestra de aproximadamente cien pistachos de cada árbol. De cada muestra, se separaron los pistachos abiertos de los cerrados. Se pesaron en conjunto los pistachos abiertos y los pistachos cerrados, obteniéndose el porcentaje en peso de pistacho abierto. De los pistachos abiertos de cada árbol, se seleccionó una submuestra al azar de diez pistachos, que se les midió el calibre y se pesó por separado cáscara y semilla. Se abrieron todos

los pistachos cerrados, se separó los pistachos cerrados llenos y cerrados vacíos. Se pesaron las cáscaras de los pistachos vacíos, obteniéndose el porcentaje de pistachos cerrados llenos y pistachos cerrados vacíos. De los pistachos cerrados llenos se tomó una submuestra al azar de diez pistachos, cuando fue posible, y se pesaron por separado cascara y semilla para obtener el peso medio de ambas fracciones. Cada muestra y submuestra se pusieron a secar por separado en horno con ventilación a 80°C durante 48 horas. Finalmente fueron pesados de nuevo para la obtención de los pesos secos.

### **3.10. Análisis estadístico.**

#### **3.10.1. Ensayo 1**

El experimento tuvo un diseño en bloques totalmente aleatorios con 3 unidades de estudio por tratamiento. Se realizó un análisis de varianza a dos vías para analizar los efectos del tratamiento de estrés y los patrones y la interacción entre ambos. Las medias fueron comparadas usando el test Duncan ( $p = 0,05$ ). El análisis se llevó a cabo con SPSS 22 (IBM Corporation, USA).

#### **3.10.2. Ensayo 2**

Se realizó un análisis multivarianza de los cinco individuos seleccionados al azar de cada portainjerto en secano y regadío. Se realizó una comparación de medias ANOVA con el programa estadísticos SPSS 22.

#### **3.10.3. Ensayo 3**

El ensayo se diseñó con un sistema de bloques repartidos al azar. Se seleccionaron los ejemplares que se encontraban en el centro del bloque para evitar efecto borde con otros tratamientos que le rodeaban. Se muestrearon los individuos y se hizo la media de los individuos del mismo tratamiento. Se realizó una comparación de medias ANOVA con el programa estadísticos SPSS 22.

## 4. Resultados

### 4.1. Ensayo 1: Efecto del patrón en el estrés hídrico creado con PEG-6000, parámetros fisiológicos y crecimiento.

#### 4.1.1. Potencial hídrico de tallo.

En la Fig. 4.1.1.1 se muestran los potenciales hídricos de tallo medidos al mediodía solar, medidos en el año 2020 en plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre PT (*P. terebinthus*), PA (*P. atlantica*) y UCB (híbrido UCB-1). Los valores más bajos de potencial se observaron al final del periodo de estrés en las plantas injertadas sobre PT sometidas a estrés hídrico (-4,50 MPa) y los valores más altos se observaron en plantas injertadas sobre UCB-1 y PA, en el tratamiento control al final del periodo de recuperación (-1,05 MPa). Se observaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) al inicio del periodo de estrés y al final del periodo de estrés, debidas al tratamiento de riego. Al final del periodo de estrés se observaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) efecto del patrón. Las plantas injertadas sobre PT mostraron un potencial hídrico significativamente más bajo que las plantas injertadas sobre UCB-1. Al final del periodo de recuperación, se observaron diferencias significativas efecto del patrón, siendo los potenciales hídricos de las plantas injertadas sobre PT significativamente más bajos que los potenciales en las plantas injertadas sobre PA y UCB-1.

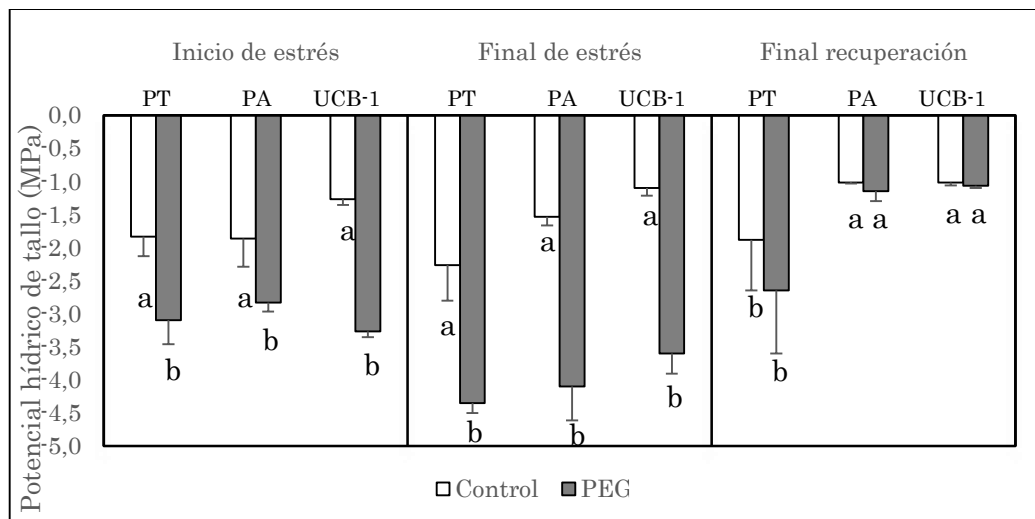


Figura 4.1.1 Potencial hídrico de tallo (MPa) medido a mediodía solar en plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT) *P. atlantica* (PA) y UCB-1 en plantas sometidas a estrés hídrico (PEG) y tratamiento control (Control). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.

#### 4.1.2. Parámetros fotosintéticos e intercambio gaseoso.

En la Tabla 4.1.2.1 se muestran los resultados relativos al intercambio gaseoso y la fotosíntesis. Al inicio del periodo de estrés, las plantas sometidas a estrés mostraron un valor de  $C_i$  (212) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las no estresadas (226). En UCB-1 no se produjo esta reducción, resultando significativa ( $p < 0,05$ ) la interacción P\*T. El diferente patrón sobre el que estaban injertadas las plantas tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la E. UCB-1 tuvo la mayor E (7,5 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), seguido de PA (6,0 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) y PT (5,2 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Las plantas sometidas a estrés mostraron una E (5,9 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control (6,7 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Las plantas injertadas sobre UCB-1 tuvieron una conductancia estomática (0,2 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre PT (0,17 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) y las injertadas sobre PA (0,15 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Las plantas sometidas a estrés tuvieron una E (0,15 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control (0,19 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). No se observó ningún efecto significativo del patrón o del tratamiento con PEG en A al inicio del periodo de estrés (Tabla 4.1.2.1). Al final del periodo de recuperación, las plantas injertadas sobre PT tuvieron una  $C_i$  (227) significativamente superior ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre UCB-1 (207) y PA (196). Las plantas sometidas a estrés mostraron un  $C_i$  (195) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control (225). Las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron una E (3,8 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que PA ( $3,0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) y PT ( $2,6 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Las plantas sometidas a estrés mostraron una E ( $2,0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control ( $4,3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Las plantas sometidas a estrés mostraron un  $g_s$  ( $0,06 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control ( $0,21 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron una A ( $13,0 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre PA ( $11,5 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) y PT ( $10,1 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Las plantas sometidas a estrés mostraron una A ( $7,9 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control ( $15,8 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Tras el periodo de recuperación, las plantas que estuvieron sometidas a estrés mostraron una  $C_i$  (218) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control (252). Las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron una E ( $4,2 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre PA ( $3,1 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) y las injertadas sobre PT ( $2,7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Las plantas que estuvieron sometidas a estrés mostraron un  $g_s$  ( $0,12 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control ( $0,19 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Las plantas injertadas sobre UCB-1, mostraron una A ( $15,6 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre PT ( $13,0 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) y PA ( $10,7 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Tabla 4.1.2.1. . Parámetros fotosintéticos concentración de CO<sub>2</sub> subestomática (C<sub>i</sub>) (μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>), transpiración (E) (mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), conductancia estomática (g<sub>s</sub>) (mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), fotosíntesis neta (A) (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) medidos sobre plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1 sometidas a dos tratamientos diferentes de estrés (Control y estrés, PEG). Las medidas fueron tomadas al inicio del periodo de estrés, al final del periodo de estrés y al final del periodo de recuperación.

Patrón	Tratamiento	Inicio Estrés				Final estrés				Recuperación			
		Ci	E	Gs	A	Ci	E	gs	A	Ci	E	gs	A
P. terebinthus	Control	240 ± 5	5,4 ± 0,8	0,18 ± 0,04	12,9 ± 2,0	231 ± 18	3,6 ± 0,5	0,2 ± 0,04	14,2 ± 1,4	266 ± 24	3,0 ± 0,1	0,19 ± 0,01	14,6 ± 1,5
	PEG	184 ± 15	4,5 ± 0,5	0,12 ± 0,02	13,7 ± 1,0	223 ± 17	1,7 ± 0,0	0,06 ± 0,01	5,9 ± 0,8	201 ± 28	2,4 ± 0,7	0,12 ± 0,05	11,5 ± 2,8
P. atlantica	Control	219 ± 4	6,7 ± 0,4	0,18 ± 0,02	14,9 ± 1,5	228 ± 8	4,2 ± 0,1	0,21 ± 0,01	15,7 ± 0,9	256 ± 7	3,6 ± 0,2	0,17 ± 0,02	12,8 ± 0,7
	PEG	200 ± 11	5,3 ± 0,7	0,12 ± 0,02	11,7 ± 1,1	164 ± 2	1,8 ± 0,0	0,06 ± 0,01	7,3 ± 0,3	248 ± 3	2,6 ± 0,5	0,10 ± 0,05	8,5 ± 2,1
UCB-1	Control	219 ± 7	7,9 ± 0,1	0,22 ± 0,01	17,4 ± 0,9	217 ± 7	5,1 ± 0,1	0,23 ± 0,01	17,6 ± 0,8	231 ± 12	4,3 ± 0,2	0,20 ± 0,01	16,0 ± 1,1
	PEG	233 ± 24	7,1 ± 0,2	0,18 ± 0,01	13,5 ± 1,8	198 ± 7	2,6 ± 0,2	0,08 ± 0,01	8,4 ± 0,5	207 ± 6	4,2 ± 0,2	0,14 ± 0,02	15,2 ± 0,1
Efecto del Patrón	P. terebinthus	226 ± 14	5,2 ± 0,6	0,17 ± 0,03	13,1 ± 1,4	227 ± 11	2,6 ± 0,5	0,13 ± 0,04	10,1 ± 2,0	233 ± 22	2,7 ± 0,4	0,16 ± 0,03	13,0 ± 1,4
	P. atlantica	209 ± 7	6,0 ± 0,5	0,15 ± 0,02	13,3 ± 1,1	196 ± 15	3,0 ± 0,5	0,13 ± 0,04	11,5 ± 1,9	252 ± 4	3,1 ± 0,3	0,14 ± 0,03	10,7 ± 1,4
	UCB-1	226 ± 12	7,5 ± 0,2	0,20 ± 0,01	15,4 ± 1,2	207 ± 6	3,8 ± 0,6	0,15 ± 0,04	13,0 ± 2,1	219 ± 8	4,2 ± 0,1	0,17 ± 0,02	15,6 ± 0,5
Efecto del tratamiento	Control	226 ± 4	6,7 ± 0,4	0,19 ± 0,02	15,1 ± 1,0	225 ± 6	4,3 ± 0,3	0,21 ± 0,01	15,8 ± 0,7	252 ± 10	3,6 ± 0,2	0,19 ± 0,01	14,4 ± 0,7
	PEG	212 ± 13	5,9 ± 0,5	0,15 ± 0,01	12,8 ± 0,9	195 ± 10	2,0 ± 0,2	0,06 ± 0,01	7,2 ± 0,5	218 ± 11	3,1 ± 0,4	0,12 ± 0,02	11,7 ± 1,4
ANOVA	Patrón	Ns	0,007	0,04	ns	0,05	0,001	ns	0,02	Ns	0,007	ns	0,035
	Tratamiento	0,05	0,02	0,03	ns	0,007	0,001	0,001	0,001	0,031	ns	0,02	ns
	P*T	0,03	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns

#### 4.1.3. Eficiencia de carboxilación, eficiencia intrínseca en el uso del agua, eficiencia instantánea en el uso de agua y Fv/Fm.

En la Tabla 4.1.3.1 se muestran los valores obtenidos de eficiencia de carboxilación (A/Ci), eficiencia intrínseca en el uso del agua (A/g<sub>s</sub>), eficiencia instantánea en el uso del agua (WUE) y Fv/Fm. Al inicio del periodo de estrés, el patrón sobre el que estaban injertadas tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) sobre la A/g<sub>s</sub>. Al inicio del periodo de estrés, la adición de PEG-6000 tuvo un efecto significativo en la eficiencia intrínseca en el uso del agua (A/g<sub>s</sub>). El patrón sobre el que estaban injertadas las plantas tuvo un efecto significativo en (A/g<sub>s</sub>) y WUE. PA indujo mayor A/g<sub>s</sub> (92,9) seguido de PT (83,3) y UCB-1 (76,7). El patrón sobre el que estaban injertadas las plantas tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la WUE. Las plantas injertadas sobre PT mostraron una mayor WUE (2,6) que las injertadas sobre PA (2,2) y UCB-1 (2,1). Se observó una interacción significativa entre el patrón sobre el que están injertadas las plantas y el tratamiento de estrés. La WUE de las plantas injertadas sobre PT aumento respecto al control frente a que las plantas injertadas sobre UCB-1 estresadas disminuyeron su WUE frente al control. Al final del periodo de estrés, hubo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) tanto del patrón como del tratamiento de estrés en A/Ci. Las plantas injertadas sobre UCB-1(0,06) y sobre PA (0,06) mostraron mayor A/Ci que las injertadas sobre PT (0,04). El tratamiento de estrés tuvo efecto significativo en A/Ci, A/g<sub>s</sub> y Fv/Fm. Tras el periodo de recuperación, las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron una A/Ci (0,07) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre PT (0,06) y las injertadas sobre PA (0,04). Las plantas injertadas sobre PT mostraron una WUE (4,9) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre UCB-1 (3,9) y sobre PA (3,7) al final de este periodo.

Tabla 4.1.3.1 Eficiencia de carboxilación (A/Ci), eficiencia intrínseca en el uso del agua (A/g<sub>s</sub>), eficiencia instantánea en el uso del agua (WUE) y F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> medidas en la aplicación de PEG (Inicio estrés), tras el periodo de estrés (Final estrés) y tras 14 días de regar las plantas exclusivamente con solución Hoagland (Recuperación).

Patrón	Tratamiento	Inicio estrés				Final estrés				Recuperación			
		A/Ci	A/g <sub>s</sub>	WUE	F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	A/Ci	A/g <sub>s</sub>	WUE	F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	A/Ci	A/g <sub>s</sub>	WUE	F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>
P. terebinthus	Control	0,05 ± 0,008	73,1 ± 6,9	2,4 ± 0,1	0,81 ± 0,01	0,06 ± 0,006	76,9 ± 14,3	4,0 ± 0,4	0,83 ± 0,001	0,06 ± 0,011	75,8 ± 10,0	4,8 ± 0,6	0,79 ± 0,02
	PEG	0,07 ± 0,001	113,7 ± 9,1	3,0 ± 0,2	0,79 ± 0,01	0,03 ± 0,006	106,7 ± 8,3	3,5 ± 0,4	0,82 ± 0,002	0,06 ± 0,007	109,0 ± 28,7	5,0 ± 0,4	0,80 ± 0,01
P. atlantica	Control	0,07 ± 0,008	84,8 ± 0,4	2,2 ± 0,1	0,80 ± 0,02	0,07 ± 0,007	74,2 ± 4,1	3,8 ± 0,2	0,83 ± 0,004	0,05 ± 0,003	74,4 ± 2,8	3,6 ± 0,0	0,81 ± 0,01
	PEG	0,06 ± 0,003	101,0 ± 9,8	2,2 ± 0,1	0,80 ± 0,02	0,04 ± 0,002	132,4 ± 1,2	4,1 ± 0,1	0,81 ± 0,004	0,03 ± 0,009	89,3 ± 5,2	3,3 ± 0,1	0,78 ± 0,02
UCB-1	Control	0,08 ± 0,007	77,5 ± 2,4	2,2 ± 0,1	0,82 ± 0,01	0,08 ± 0,006	77,2 ± 1,6	3,5 ± 0,1	0,84 ± 0,002	0,07 ± 0,009	80,6 ± 1,8	3,7 ± 0,1	0,79 ± 0,02
	PEG	0,06 ± 0,013	75,9 ± 11,0	1,9 ± 0,3	0,81 ± 0,01	0,04 ± 0,001	112,9 ± 6,1	3,2 ± 0,1	0,82 ± 0,004	0,07 ± 0,002	93,0 ± 4,6	3,7 ± 0,1	0,78 ± 0,01
Efecto patrón	P. terebinthus	0,06 ± 0,007	83,3 ± 11,3	2,6 ± 0,2	0,81 ± 0,01	0,04 ± 0,009	91,8 ± 9,9	3,8 ± 0,3	0,82 ± 0,002	0,06 ± 0,006	92,4 ± 15,5	4,9 ± 0,3	0,80 ± 0,01
	P. atlantica	0,06 ± 0,004	92,9 ± 5,7	2,2 ± 0,1	0,80 ± 0,01	0,06 ± 0,006	103,3 ± 13,1	4,0 ± 0,1	0,82 ± 0,005	0,04 ± 0,005	81,9 ± 4,2	3,4 ± 0,1	0,80 ± 0,01
	UCB-1	0,07 ± 0,008	76,7 ± 5,0	2,1 ± 0,2	0,82 ± 0,01	0,06 ± 0,009	95,0 ± 8,5	3,4 ± 0,1	0,83 ± 0,004	0,07 ± 0,004	86,8 ± 3,5	3,7 ± 0,1	0,79 ± 0,01
Efecto tratamiento	Control	0,07 ± 0,005	78,4 ± 2,7	2,3 ± 0,1	0,81 ± 0,01	0,07 ± 0,004	76,1 ± 4,3	3,8 ± 0,2	0,83 ± 0,002	0,06 ± 0,005	77,0 ± 3,2	4,0 ± 0,3	0,80 ± 0,01
	PEG	0,06 ± 0,006	92,1 ± 8,2	2,2 ± 0,2	0,80 ± 0,01	0,04 ± 0,003	117,3 ± 4,9	3,6 ± 0,2	0,82 ± 0,002	0,05 ± 0,006	97,1 ± 9,1	4,0 ± 0,3	0,79 ± 0,01
ANOVA	Patron	Ns	0,05	0,02	ns	0,017	ns	ns	ns	0,007	ns	0,001	ns
	Tratamiento	Ns	0,01	ns	ns	0,001	0,001	ns	0,001	ns	ns	ns	ns
	P*T	Ns	0,03	0,02	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

#### 4.1.4. Concentración en hoja de clorofila, flavonoles y antocianinas.

Al inicio del periodo de estrés se observaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la concentración de clorofila, flavonoles y antocianinas (datos no mostrados) debidas al patrón. PA y UCB-1 tuvieron mayor concentración de clorofila ( $47,70$  y  $45,20 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$  respectivamente) frente a PT ( $41,32 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). La concentración de flavonoles aumento significativamente, PT tuvo la concentración de flavonoles mas alta ( $3,18 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), seguido de PA ( $2,85 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) y UCB-1 ( $2,85 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Las plantas injertadas sobre PT tuvieron mayor concentración de antocianinas ( $0,096 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) que las plantas injertadas sobre PA ( $0,078 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) y UCB-1 ( $0,072 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ).

Al final del periodo de estrés, el tratamiento con PEG-6000 aumento significativamente ( $p < 0,05$ ) la concentración de flavonoles. En este periodo, el patrón sobre el que estaban injertadas las afecto significativamente ( $p < 0,05$ ) a la concentración de clorofila, flavonoles y antocianinas. Las plantas injertadas sobre PA y UCB-1 tuvieron una concentración de clorofilas significativamente mayor ( $49,22$  y  $49,15 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  respectivamente) que las injertadas sobre PT ( $43,74 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). La concentración de Flavonoles fue significativamente mayor en las plantas injertadas sobre PT ( $3,09 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), seguida por la concentración de las plantas injertadas sobre PA ( $2,93 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) y las injertadas sobre UCB-1 ( $2,73 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). La concentración de antocianinas fue mayor en las plantas injertadas sobre PT ( $0,123 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), seguida de las plantas injertadas sobre PA ( $0,104 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) y las plantas injertadas sobre UCB-1 ( $0,100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ).

Tras el periodo de recuperación, se observó un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) del tratamiento de estrés en las concentraciones de clorofila (Fig. 4.1.4.1), flavonoles (Fig. 4.1.4.2) y antocianinas (Fig. 4.1.4.3). Se observó una interacción significativa entre el patrón y el tratamiento de estrés. UCB-1 fue el patrón que estimulo mayor síntesis de flavonoles efecto del estrés hídrico con respecto al control que los otros dos patrones (Fig. 4.1.4.2).

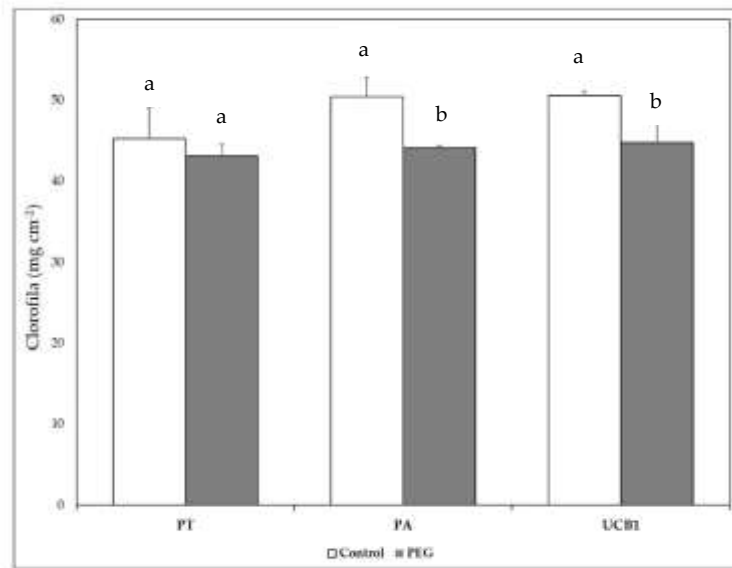


Figura 4.1.4.1 Concentración de clorofila (Clor) en mg cm<sup>-2</sup> al final del periodo de recuperación en plantas de *P. vera* L. cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados

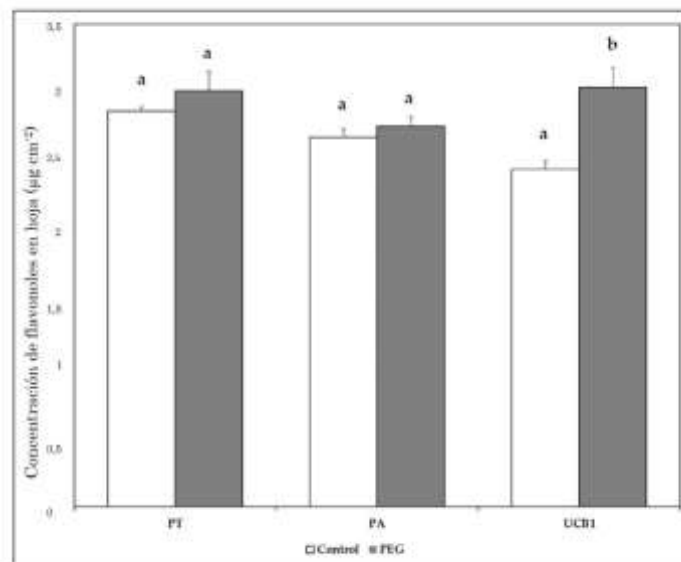


Figura 4.1.4.2 Concentración de flavonoles (Flav) en µg cm<sup>-2</sup> al final del periodo de recuperación en plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados

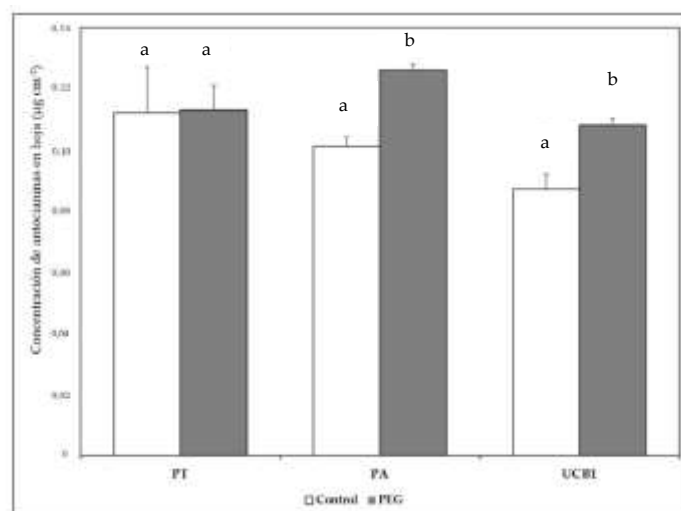


Figura 4.1.4.3 Concentración de Antocianinas (Ant) en  $\mu\text{g cm}^{-2}$  al final del periodo de recuperación en plantas de *P. vera* L. cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.

#### 4.1.5. Biomasa.

En la Fig. 4.1.5.1 se muestran los valores de biomasa seca total (g), biomasa seca de hojas (g) y biomasa seca de ramas (g) de las plantas injertadas sobre PT, PA y UCB-1 control y sometidas a estrés. El patrón sobre el que estaban injertadas las plantas tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la producción de biomasa. Las plantas injertadas sobre UCB-1 produjeron más biomasa (204,5 g) que las injertadas sobre PA (150,0 g) y las injertadas sobre PT (92,1 g). El tratamiento de estrés tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la producción de biomasa y las plantas sometidas a estrés produjeron menos biomasa total (117,7 g) que las plantas control (179,8 g). Las plantas injertadas sobre UCB-1 produjeron significativamente ( $p < 0,05$ ) mayor biomasa de hojas (94,45 g) que las plantas injertadas sobre PA (63,9 g) y las plantas injertadas sobre PT (41,7 g). El tratamiento de estrés tuvo efecto significativo ( $p < 0,05$ ) sobre la biomasa de las hojas, produciendo las plantas sometidas a estrés menor biomasa foliar (53,5 g) que las plantas control (79,9 g). Las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron una biomasa de ramas (109,8 g) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre PA (86,09 g) y las injertadas PT (50,4 g). El tratamiento de estrés redujo significativamente ( $p < 0,05$ ) la biomasa de ramas (64,3 g) frente a las plantas control (99,9 g). Hubo una interacción significativa ( $p < 0,05$ ) entre patrón y tratamiento de estrés, siendo las plantas sometidas a estrés e injertadas sobre PA, las que menos redujeron su biomasa de ramas respecto al control (82,1 vs. 90,1 g)

frente a las plantas injertadas sobre UCB-1 (71,3 vs. 148,3 g) y PT (39,4 vs. 61,5 g).

En las Fig. 4.1.5.2 y Fig. 4.1.5.3 se muestran los valores de número de hojas, área foliar unitaria (cm<sup>2</sup>) y área foliar total de las plantas injertadas sobre PT, PA y UCB-1 sometidas a estrés y control. Las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron un n. de hojas (108) significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre PA (81) y sobre PT (59). El tratamiento de estrés, redujo significativamente el número de hojas (69 vs. 96). No hubo efecto significativo sobre el área foliar unitaria ni debido al patrón ni al tratamiento con PEG. El patrón sobre el que estaban injertadas las plantas influyó significativamente ( $p < 0,05$ ) el área foliar total (cm<sup>2</sup>). Las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron un área foliar total de 4.825,0 cm<sup>2</sup>, las injertadas sobre PA 3.292,7 cm<sup>2</sup> y las injertadas sobre PT 2.619,5 cm<sup>2</sup>. Las plantas que recibieron el tratamiento de estrés mostraron un área foliar total (2.468,4 cm<sup>2</sup>) significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que las plantas control (4.689,8 cm<sup>2</sup>).

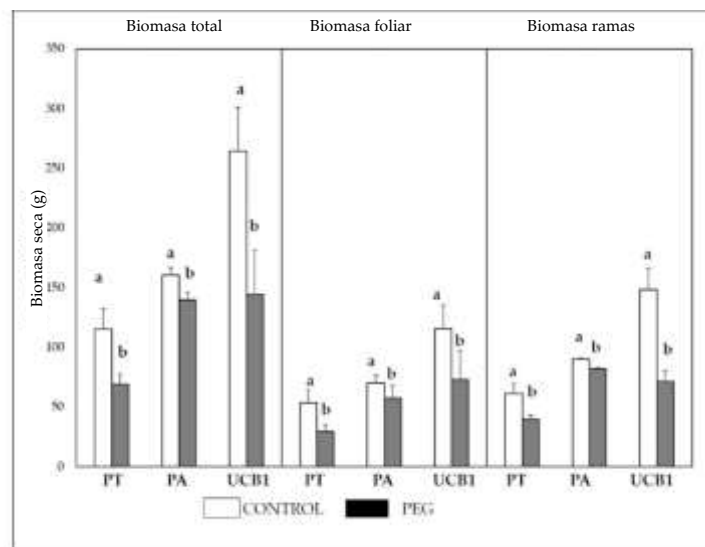


Figura 4.1.5.1. Biomasa seca de plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus*, *P. atlantica* y UCB-1 dividido en biomasa seca total (g), biomasa seca de hojas (g) y biomasa seca de ramas (g). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.

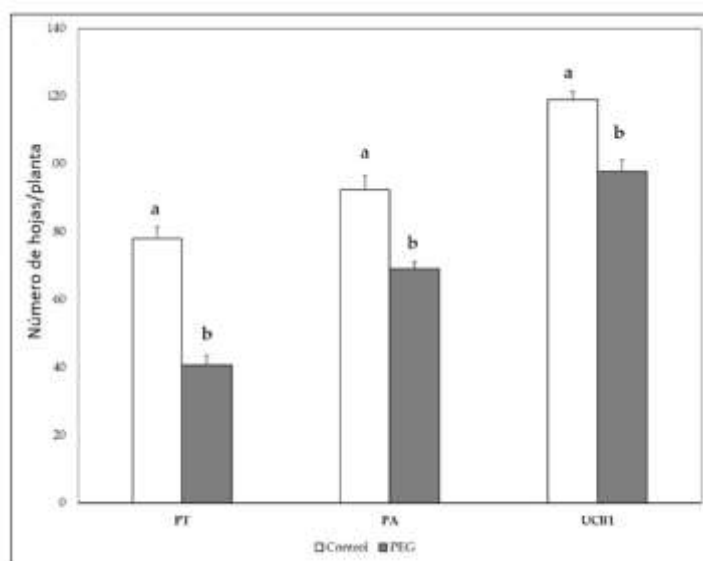


Figura 4.1.5.2 Número de hojas planta<sup>-1</sup> de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* L. (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1 sometidas a estrés hídrico (PEG) y sin limitación de riego (Control). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.

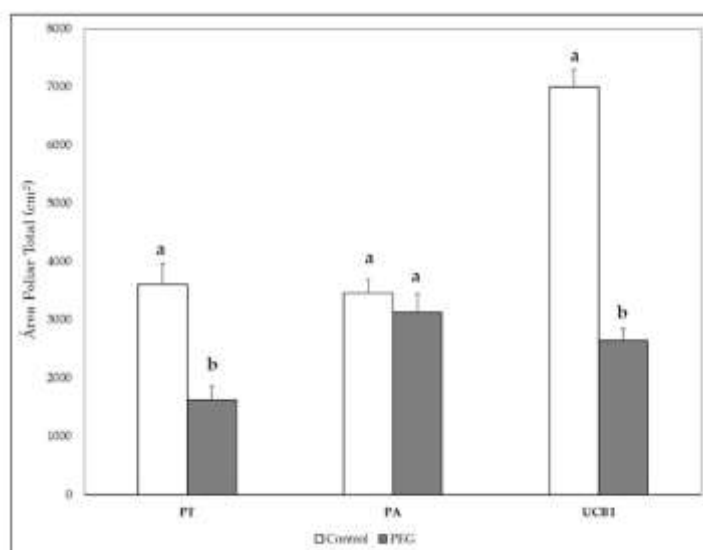


Figura 4.1.5.3 Área foliar total de plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* L. (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1 sometidas a estrés hídrico (PEG) y sin limitación de riego (Control). Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.

## 4.2. Ensayo 2: Efecto del patrón en parámetros fisiológicos, crecimiento y producción en plantas en regadío y en seco.

### 4.2.1. Potencial hídrico.

La Figura 15 muestra los potenciales hídricos de las plantas en las medidas realizadas en 2022. El 2 de agosto, los potenciales oscilaron entre -1,72 MPa, valor obtenido en las plantas control injertadas sobre *P. terebinthus* y -2,40 MPa, valor obtenido en las plantas sometidas a estrés injertadas sobre UCB-1 (Fig. 4.2.1.1). No se observaron diferencias significativas atribuibles a los diferentes patrones. Se observaron diferencias significativas entre las plantas en regadío y las plantas en seco, siendo el potencial más bajo en las plantas en seco (-2,30 vs. -1,85 MPa, Fig. 4.2.1.1). El 25 de agosto, los valores de potencial hídrico, oscilaron entre -1,70 MPa, valor obtenido en las plantas en regadío injertadas sobre UCB-1 y -2,40 MPa, valor obtenido en las plantas en seco injertadas sobre *P. atlantica* (Fig. 4.2.1.1). No se observaron diferencias significativas efecto del patrón sobre el que estaban injertadas las plantas. Se observaron diferencias significativas debidas al riego, siendo el potencial significativamente más bajo en las plantas en seco (-2,2 vs. -1,8 MPa, Fig. 4.2.1.1).

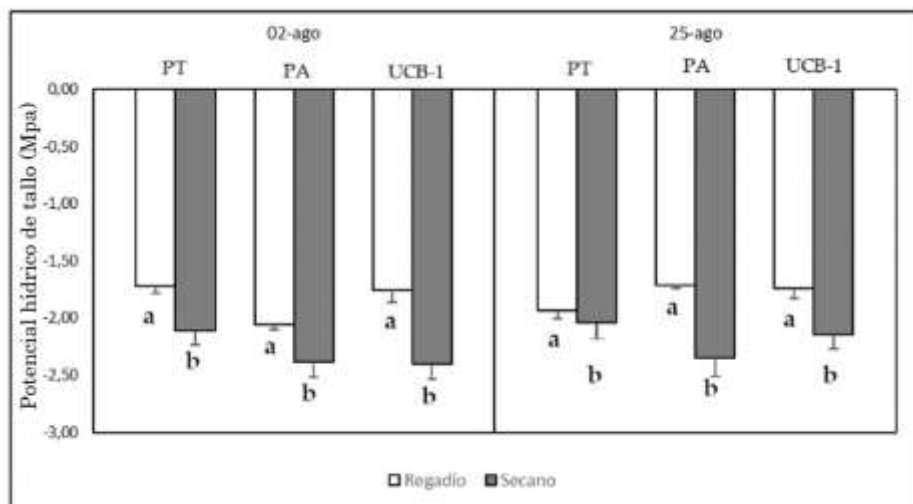


Figura 4.2.1.1 Potencial hídrico de tallo (MPa), medido al mediodía solar el 02/08 y el 25/08 en plantas de *Pistacia vera* L. cv Kerman injertadas sobre *Pistacia terebinthus* L. (PT), *Pistacia atlantica* Desf.(PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.

#### 4.2.2. Parámetros fotosintéticos (conductancia estomática y transpiración).

La conductancia estomática osciló entre  $0,24 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , en las plantas en regadío injertadas sobre *P. terebinthus* y  $0,29 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , valores obtenidos en las plantas en secano injertadas sobre *P. atlantica* (Tabla 4.2.2.1). Se observaron diferencias significativas debidas al patrón sobre el que estaban injertadas las plantas. Las plantas injertadas sobre *Pistacia atlantica* tuvieron mayor conductancia estomática que las injertadas sobre *Pistacia terebinthus* y UCB-1 ( $0,284 \text{ vs. } 0,253 \text{ y } 0,247 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respectivamente). No se observaron diferencias significativas debidas al riego de las mismas (Tabla 4.2.2.1). Los valores de E oscilaron entre  $7,3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , valores obtenidos en las plantas en regadío injertadas sobre *P. terebinthus* y  $9,3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , valores obtenidos en las plantas en secano injertadas sobre *P. atlantica* (Tabla 10). El patrón sobre el que estaban injertadas las plantas tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la transpiración. Las plantas injertadas sobre *Pistacia atlantica* y UCB-1 mostraron una transpiración más alta que las plantas injertadas sobre *Pistacia terebinthus* ( $9,0 \text{ y } 8,9 \text{ vs. } 7,5 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  respectivamente, Tabla 4.2.2.1). El riego no tuvo un efecto significativo en la transpiración de las plantas.

Tabla 4.2.2.1 Parámetros de intercambio gaseoso, conductancia estomática ( $g_s$ ) y transpiración (E) medidas con sonda Li-Cor, en plantas de *Pistacia vera* L. cv Kerman injertadas sobre *Pistacia terebinthus* L., *Pistacia atlantica* Desf. y UCB-1.

Patrón	Tratamiento	25/08/2022	
		$g_s$	E
<i>P. terebinthus</i>	Regadío	0,24 ± 0,02	7,3 ± 0,5
	Secano	0,27 ± 0,02	7,7 ± 0,4
<i>P. atlantica</i>	Regadío	0,28 ± 0,02	8,6 ± 0,5
	Secano	0,29 ± 0,01	9,3 ± 0,3
UCB-1	Regadío	0,26 ± 0,01	8,9 ± 0,3
	Secano	0,24 ± 0,01	8,9 ± 0,3
Efecto patrón	<i>P. terebinthus</i>	0,25 ± 0,01	7,5 ± 0,3
	<i>P. atlantica</i>	0,29 ± 0,01	9,0 ± 0,3
	UCB-1	0,25 ± 0,01	8,9 ± 0,2
Efecto tratamiento	Regadío	0,26 ± 0,01	8,3 ± 0,3
	Secano	0,27 ± 0,01	8,6 ± 0,2
ANOVA	Patrón	0,04	0,002
	Tratamiento	ns	ns
	P*T	ns	ns

#### 4.2.3. Concentración en hoja de clorofila, flavonoles y antocianinas.

En la tabla 4.2.3.1 se muestran los valores de concentración de clorofila ( $mg\ cm^{-2}$ ), concentración de flavonoles ( $\mu g\ cm^{-2}$ ) y concentración de antocianinas ( $\mu g\ cm^{-2}$ ) medidos en 2022. El 5 de agosto, la concentración de clorofila osciló entre  $54,7\ mg\ cm^{-2}$ , valor obtenido en las plantas en regadío injertadas sobre *P. atlantica* y  $47,6\ mg\ cm^{-2}$ , valor obtenido en las plantas en secano injertadas sobre *P. atlantica* (Tabla 4.2.3.1). Se observaron diferencias significativas debidas al patrón sobre el que estaban injertadas las plantas. Las plantas que mostraron mayor concentración de clorofila fueron las injertadas sobre *P. terebinthus* L., con una

concentración de  $54,1 \text{ mg cm}^{-2}$  y las plantas que mostraron una concentración significativamente más baja ( $p < 0,05$ ) fueron las injertadas sobre *P. atlantica* Desf. con una concentración de  $49,1 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$  (Tabla 4.2.3.1). El tratamiento de riego tuvo un efecto significativo en la concentración de clorofila de las plantas. Las plantas en secano tuvieron una concentración de clorofila significativamente menor que las plantas regadas ( $50,5 \text{ vs. } 52,0 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$ , Tabla 4.2.3.1).

La concentración de flavonoles osciló entre  $3,3 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$  (Kerman sobre PT y PA en regadío) y  $3,6 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$  (Kerman sobre PA en secano, Tabla 4.2.3.1). El patrón sobre el que estaban injertadas las plantas tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la concentración de flavonoles de las plantas. Las plantas injertadas sobre UCB-1 y *P. atlantica* Desf. mostraron una concentración de flavonoles  $3,5 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$  frente a las plantas injertadas sobre *P. terebinthus* L. de  $3,4 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$  (Tabla 4.2.3.1). Las plantas en secano, tuvieron una concentración de flavonoles significativamente ( $p < 0,05$ ) mayor que las plantas en regadío ( $3,5 \text{ vs. } 3,4 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$ ) (Tabla 4.2.3.1).

Se observó una interacción entre las dos variables estudiadas, patrón y riego. En la Figura 4.2.3.1 se muestra la concentración de flavonoles en las plantas injertadas sobre los tres patrones. Las plantas injertadas sobre *P. atlantica* Desf. aumentaron su concentración de flavonoles un 9% con respecto a las plantas en regadío efecto del estrés hídrico frente a las plantas injertadas sobre *P. terebinthus* L. y UCB-1 que aumentaron su concentración un 3% con respecto a las plantas en regadío (Fig. 4.2.3.1).

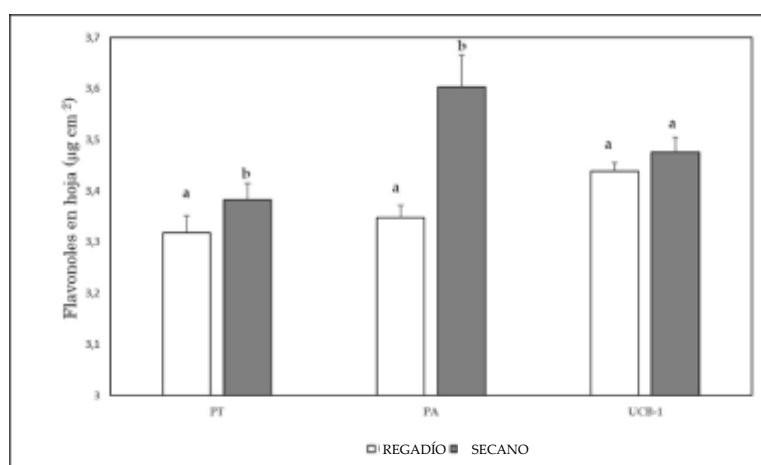


Figura 4.2.3.1. Concentración de flavonoles ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) en plantas de *P. vera* cv. Kerman injertadas sobre *P. terebinthus* (PT), *P. atlantica* (PA) y UCB-1. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados en secano y en regadío. Las letras diferentes indican diferencias significativas en los resultados.

El 25 de agosto la concentración de clorofila osciló entre 48,9 mg cm<sup>-2</sup>, valor obtenido en las plantas en secano injertadas sobre *P. atlantica* Desf. y 51,5 mg cm<sup>-2</sup>, valor obtenido en las plantas en regadío injertadas sobre *P. atlantica* Desf. (Tabla 4.2.3.1). No tuvieron efecto significativo ( $p < 0,05$ ) ni el patrón ni el riego en la concentración de clorofilas de las plantas (Tabla 4.2.3.1). La concentración de flavonoles osciló entre 3,4 µg cm<sup>-2</sup>, valor observado en las plantas en regadío injertadas sobre *P. atlantica* Desf. y UCB-1 y 3,6 µg cm<sup>-2</sup>, valor obtenido en las plantas en secano injertadas sobre *P. atlantica* Desf. (Tabla 4.2.3.1). El patrón sobre el que estaban injertadas no tuvo efecto en la concentración de flavonoles. El riego tuvo efecto significativo en la concentración de flavonoles. Las plantas en secano tuvieron una concentración de flavonoles significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que las plantas en regadío (3,5 vs. 3,4 µg cm<sup>-2</sup>, Tabla 4.2.3.1). La concentración de antocianinas osciló entre 0,14 µg cm<sup>-2</sup>, valor obtenido en las plantas en regadío injertadas sobre UCB-1 y 0,16 µg cm<sup>-2</sup>, valor obtenido en las plantas control injertadas sobre *P. terebinthus* L. y *P. atlantica* Desf. (Tabla 4.2.3.1). El patrón sobre el que estaban injertadas las plantas no tuvo efecto en la concentración de antocianinas (Tabla 10). El tratamiento de riego no tuvo efecto significativo en la concentración de antocianinas en hoja (Tabla 4.2.3.1).

La concentración de antocianinas en hoja osciló entre 0,12 µg cm<sup>-2</sup>, valores obtenidos en las plantas control injertadas sobre *P. terebinthus* L. y 0,16 µg cm<sup>-2</sup>, valor obtenido en las plantas no regadas injertadas sobre *P. atlantica* Desf. (Tabla 4.2.3.1). Se observó una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) efecto del patrón sobre el que estaban injertadas las plantas. Las plantas injertadas sobre *P. atlantica* Desf. tuvieron una concentración de antocianinas significativamente ( $p < 0,05$ ) más alta (0,14 µg cm<sup>-2</sup>) que las injertadas sobre *P. terebinthus* L. (0,12 µg cm<sup>-2</sup>, Tabla 4.2.3.1). Las plantas injertadas sobre UCB-1 tuvieron una concentración intermedia entre los otros dos patrones estudiados (0,13 µg cm<sup>-2</sup>, Tabla 4.2.3.1). El secano en las plantas tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la concentración de antocianinas de las plantas. Las plantas en secano aumentaron su concentración de antocianinas en hojas (0,14 vs. 0,13 µg cm<sup>-2</sup>) respecto a las plantas control (Tabla 4.2.3.1).

Tabla 4.2.3.1. Concentración de clorofila ( $\text{mg cm}^{-2}$ ), flavonoles ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) y antocianinas ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ), medido en plantas de *Pistacia vera* L. cv. Kerman injertadas sobre *Pistacia terebinthus* L., *Pistacia atlantica* Desf. y UCB-1.

Patrón	Tratamiento	05/08/2023			25/08/2023		
		Clorofila	Flavonoles	Antocianinas	Clorofila	Flavonoles	Antocianinas
<i>P. terebinthus</i>	Regadío	54,7 ± 0,6	3,3 ± 0,03	0,12 ± 0,004	50,4 ± 1,0	3,5 ± 0,04	0,16 ± 0,004
	Secano	53,5 ± 1,0	3,4 ± 0,03	0,12 ± 0,006	51,2 ± 0,5	3,5 ± 0,03	0,15 ± 0,003
<i>P. atlantica</i>	Regadío	50,7 ± 0,5	3,3 ± 0,02	0,13 ± 0,005	51,5 ± 0,6	3,4 ± 0,02	0,16 ± 0,003
	Secano	47,6 ± 1,5	3,6 ± 0,06	0,16 ± 0,004	48,9 ± 1,1	3,6 ± 0,05	0,15 ± 0,005
UCB-1	Regadío	50,6 ± 0,6	3,4 ± 0,02	0,13 ± 0,003	49,3 ± 0,5	3,4 ± 0,01	0,14 ± 0,001
	Secano	50,4 ± 0,6	3,5 ± 0,03	0,14 ± 0,001	49,2 ± 0,9	3,5 ± 0,02	0,15 ± 0,006
Efecto patrón	<i>P. terebinthus</i>	54,1 ± 0,6	3,4 ± 0,02	0,12 ± 0,003	50,9 ± 0,5	3,5 ± 0,03	0,15 ± 0,003
	<i>P. atlántica</i>	49,1 ± 0,9	3,5 ± 0,05	0,14 ± 0,005	50,2 ± 0,7	3,5 ± 0,04	0,15 ± 0,004
	UCB-1	50,5 ± 0,4	3,5 ± 0,02	0,13 ± 0,002	49,3 ± 0,5	3,4 ± 0,02	0,15 ± 0,003
Efecto tratamiento	Regadío	52,0 ± 0,6	3,4 ± 0,02	0,13 ± 0,003	50,5 ± 0,4	3,4 ± 0,02	0,15 ± 0,002
	Secano	50,5 ± 0,9	3,5 ± 0,03	0,14 ± 0,004	49,8 ± 0,5	3,5 ± 0,02	0,15 ± 0,003
ANOVA	Patrón	0,001	0,004	0,001	Ns	ns	ns
	Tratamiento	0,05	0,001	0,003	Ns	0,001	ns
	P*T	ns	0,011	ns	Ns	ns	ns

#### 4.2.4. Biomasa y crecimiento de las plantas.

La longitud de los brotes osciló entre 72 cm y 96 cm (Tabla 4.2.4.1). No hubo efecto significativo del portainjerto ni del riego en la longitud del brote (Tabla 4.2.4.1). El diámetro del patrón osciló entre 62 mm y 72 mm, (Tabla 4.2.4.1). El patrón UCB-1 tuvo mayor diámetro ( $p < 0,05$ ) que *P. terebinthus* y *P. atlantica* (70 vs. 63 y 62 mm respectivamente). No hubo efecto significativo del tratamiento de riego en el diámetro del patrón (Tabla 4.2.4.1). El diámetro de la variedad medido a 1 m de altura osciló entre 49 mm y 62 mm (Tabla 4.2.4.1). No hubo efecto significativo del patrón (Tabla 4.2.4.1). En cambio, el tratamiento de riego tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en el diámetro de la variedad medido a 1 m de altura. La variedad tuvo un diámetro mayor en las plantas regadas que en las plantas en seco (59 vs. 51 mm, Tabla 4.2.4.1). El área de la proyección de la copa osciló entre 3,3 m<sup>2</sup> y 4,8 m<sup>2</sup>, (Tabla 4.2.4.1).: Las plantas injertadas sobre UCB-1 tuvieron mayor superficie de copa ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre *P. terebinthus* y *P. atlantica* (4,6 vs. 3,9 y 3,6 m<sup>2</sup> respectivamente). No hubo efecto significativo del tratamiento de riego en superficie de la copa (Tabla 4.2.4.1). El volumen de copa osciló entre 0,5 m<sup>3</sup> (Tabla 4.2.4.1). Las plantas injertadas sobre UCB-1 tuvieron significativamente ( $p < 0,05$ ) mayor volumen de copa que las injertadas sobre *P. terebinthus* y *P. atlantica* (0,8 vs. 0,6 y 0,6 m<sup>3</sup> respectivamente, Tabla 4.2.4.1).

Tabla 4.2.4.1. Longitud del brote (cm), diámetro del patrón (mm), diámetro de la variedad a 1 m de altura (mm), superficie de la copa (m<sup>2</sup>) y volumen de copa (m<sup>3</sup>) de plantas de *P. vera* L. cv. Kerman regadas y en secado injertadas sobre *P. terebinthus* L., *P. atlantica* Desf. y UCB-1.

Patrón	Tratamiento	Longitud brote (cm)	Diámetro patrón (mm)	Diámetro variedad (mm)	Área proyección copa (m <sup>2</sup> )	Volumen de copa (m <sup>3</sup> )
<i>P. terebinthus</i>	Regadío	84 ± 9	64 ± 2	58 ± 1	4,5 ± 0,5	0,8 ± 0,10
	Secano	80 ± 4	62 ± 1	49 ± 3	3,3 ± 0,3	0,5 ± 0,07
<i>P. atlántica</i>	Regadío	83 ± 10	62 ± 2	56 ± 5	3,6 ± 0,4	0,5 ± 0,08
	Secano	72 ± 6	62 ± 2	50 ± 2	3,7 ± 0,3	0,6 ± 0,06
UCB-1	Regadío	96 ± 8	72 ± 1	62 ± 2	4,8 ± 0,2	0,9 ± 0,05
	Secano	79 ± 9	68 ± 2	55 ± 2	4,4 ± 0,1	0,8 ± 0,04
Efecto patrón	<i>P. terebinthus</i>	82 ± 5	63 ± 1	53 ± 2	3,9 ± 0,3	0,6 ± 0,07
	<i>P. atlantica</i>	77 ± 6	62 ± 1	53 ± 3	3,6 ± 0,2	0,6 ± 0,05
	UCB-1	87 ± 6	70 ± 1	59 ± 2	4,6 ± 0,1	0,8 ± 0,04
Efecto tratamiento	Regadío	88 ± 5	66 ± 1	59 ± 2	4,3 ± 0,2	0,7 ± 0,06
	Secano	77 ± 4	64 ± 1	51 ± 1	3,8 ± 0,2	0,6 ± 0,05
ANOVA	Patrón	ns	0,001	ns	0,017	0,02
	Tratamiento	ns	ns	0,004	ns	ns
	P*T	ns	ns	ns	ns	ns

#### 4.2.5. Producción.

La Tabla 4.2.5.1 muestra la cosecha obtenida por árbol y la calidad de la cosecha expresada en porcentaje de frutos abiertos, cerrados y vacíos de árboles de *P. vera* L. cv Kerman injertados sobre los portainjertos *P. terebinthus*, *P. atlantica* y UCB-1. La producción osciló entre 2,1 y 5,1 Kg árbol<sup>-1</sup>. El patrón tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) donde las plantas más productivas fueron las injertadas sobre *P. terebinthus*. El porcentaje de frutos abiertos osciló entre un 49 y 68 %. Se observó un posible efecto del patrón que sin llegar a ser significativo marca la tendencia que las plantas injertadas sobre UCB-1 tuvieron menor porcentaje de frutos abiertos (Tabla 4.2.5.1). El porcentaje de frutos cerrados osciló entre un 15 y 35%. El patrón tuvo un efecto significativo sobre el porcentaje de frutos cerrados, siendo las plantas injertadas sobre UCB-1 las que tuvieron mayor porcentaje de frutos cerrados (Tabla 4.2.5.1). El porcentaje de frutos vacíos osciló entre el 10 y

16%. No se observó efecto del patrón ni del riego sobre el porcentaje de frutos vacíos (Tabla 4.2.5.1).

Tabla 4.2.5.1. Producción y calidad de la cosecha (porcentaje de pistacho abierto, porcentaje de pistacho cerrado y porcentaje de pistacho vacío) en plantas de *Pistacia vera* L. cv. Kerman injertadas sobre *Pistacia terebinthus* L., *Pistacia atlantica* Desf. y UCB-1

		2023			
Patrón	Tratamiento	Producción (Kg/árbol)	Abierto (%)	Cerrado (%)	Vacío (%)
<i>P. terebinthus</i>	Regadío	5,1 ± 0,9	67 ± 6	18 ± 7	12 ± 4
	Secano	3,5 ± 0,5	56 ± 4	25 ± 3	16 ± 2
<i>P. atlántica</i>	Regadío	2,2 ± 0,8	55 ± 5	26 ± 5	13 ± 2
	Secano	2,1 ± 0,5	68 ± 3	15 ± 3	10 ± 1
UCB-1	Regadío	3,7± 0,8	49 ± 8	35 ± 8	13 ± 1
	Secano	2,7± 0,4	51 ± 5	35 ± 6	11 ± 3
Efecto patrón	<i>P. terebinthus</i>	4,3 ± 0,6	62 ± 4	22 ± 4	14 ± 2
	<i>P. atlantica</i>	2,2 ± 0,5	62 ± 4	21 ± 3	11 ± 1
	UCB-1	3,2 ± 0,4	50 ± 5	35 ± 5	12 ± 2
Efecto tratamiento	Regadío	3,7 ± 0,5	57 ± 4	27 ± 4	13 ± 1
	Secano	2,8 ± 0,3	58 ± 3	25 ± 3	12 ± 1
ANOVA	Patrón	0,021	0,078	0,023	ns
	Tratamiento	ns	ns	ns	ns
	P*T	ns	ns	ns	ns

### 4.3. Ensayo 3: Efecto del RDC en árboles adultos de *P. vera* L cv. Kerman sobre *P. terebinthus* en contenido de pigmentos de hoja, crecimiento, producción y calidad de cosecha.

#### 4.3.1. Potencial hídrico de tallo y dosis de riego

Los potenciales hídricos de tallo oscilaron entre -1,0 y -2,48 MPa medidos en tratamiento T2 y T3 respectivamente en el año 2017. En el año 2018 oscilaron entre -1,10 y -2,47 MPa valores obtenidos en T0 y T3 respectivamente. En el año

2019, los valores de potencial oscilaron entre -1,26 y 2,77 MPa valores obtenidos en T0 y T3 respectivamente. Cabe señalar que en el año 2019 hubo episodios de fuertes lluvias que se extendieron hasta el final de la campaña, por lo que la última medida de potencial se realizó en DOY 228. En el año 2020 los potenciales oscilaron entre -1,11 y -2,57 MPa en T0 y T3 respectivamente (Fig. 4.3.1.1).

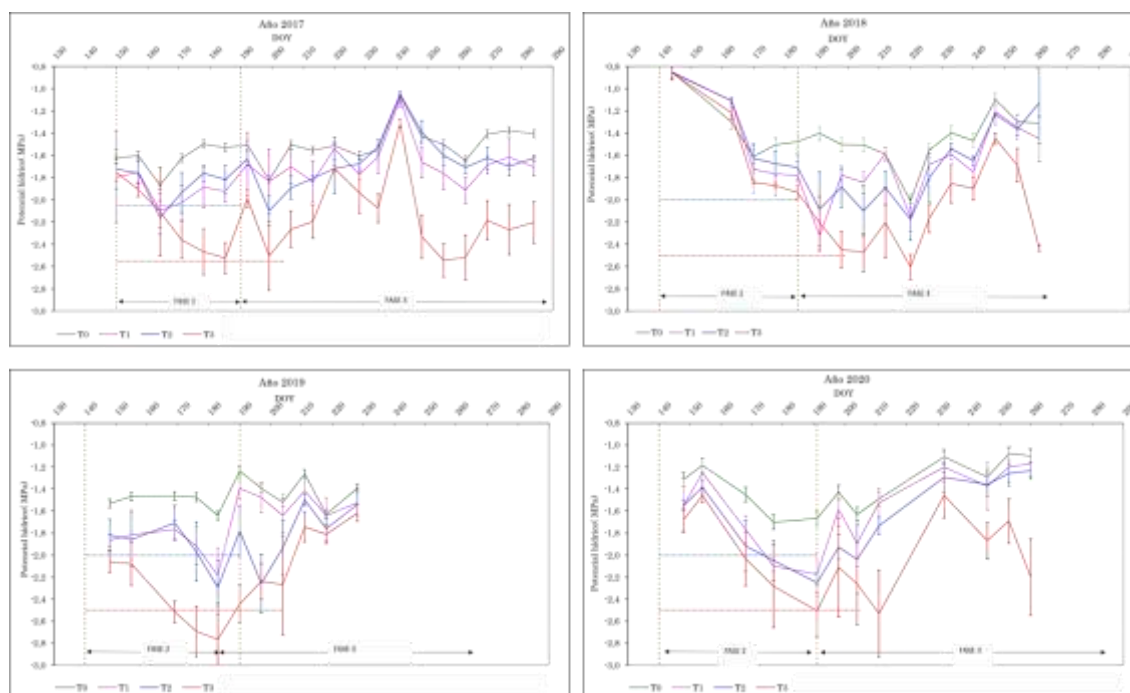


Figura 4.3.1.1 Potencial hídrico de tallo medido en una plantación adulta de pistachos de la variedad kerman injertados sobre *P. terebinthus* durante los años 2017, 2018, 2019 y 2020. Las líneas verticales señalan la fase 2, endurecimiento de la cáscara, y la fase 3, crecimiento del embrión. T0: Se regó reponiendo la ETC de la semana anterior en todas las fases de crecimiento del fruto, con un umbral de potencial hídrico de -1,1 MPa, T1, se mantuvo en un umbral de -2 MPa durante fase 2 (línea discontinua azul) y -1,5 MPa durante fase 3; T2 fue similar a T1, pero se amplió 15 días el umbral de -2 MPa durante la fase 2, T3, su potencial umbral fue -2,5 MPa durante la fase 2 y durante 15 días más (línea discontinua roja), mientras que el umbral fue de -2 MPa durante fase 3.

En la Tabla 4.3.1.1 se muestra el riego (mm) aplicado anualmente en cada tratamiento y fase de desarrollo del fruto. También se muestra la media de los cuatro años de estudio.

En la fase I de desarrollo de fruto se aplicaron de media 16 mm en T0, 3 mm en T1, 2 mm en T2 y 1 mm en T3. Durante la fase II se aplicaron de media 49 mm en T0, 17 mm en T1, 15 mm en T2 y 6 mm en T3. En la fase III de desarrollo del fruto se aplicaron 424 mm en T0, 285 mm en T1, 241 mm en T2 y 157 mm en T3. La dotación media aplicada a cada tratamiento fueron 490 mm en T0, 305 mm en T1, 258 mm en T2 y 163 mm en T3.

Tabla 4.3.1.1. Dotación de riego aplicada a cada tratamiento en cada fase de desarrollo del fruto (mm) y el total aplicado durante los años de estudio 2017, 2018, 2019,2020 (mm año<sup>-1</sup>)

Año	Tratamiento	Fase I	Fase II	Fase III	Total (mm año <sup>-1</sup> )
2017	T0	17	91	206	313
	T1	1	42	174	216
	T2	0	39	149	189
	T3	0	2	131	134
2018	T0	0	28	474	502
	T1	0	4	383	386
	T2	0	2	283	285
	T3	0	2	204	206
2019	T0	26	22	645	693
	T1	6	11	278	295
	T2	6	11	208	225
	T3	2	9	174	185
2020	T0	24	57	369	450
	T1	4	12	307	323
	T2	2	8	325	335
	T3	1	9	118	127
Media	T0	16	49	424	490
	T1	3	17	285	305
	T2	2	15	241	258
	T3	1	6	157	163

## 4.3.2. Clorofila, flavonoles y antocianinas.

Tabla 4.3.2.1. Concentración en hoja de clorofila ( $\text{mg cm}^{-2}$ ), flavonoles ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) y antocianinas ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ).

Año	Tratamiento	Fecha 1	Fecha 2	Fecha 3	Fecha 4	Fecha 5	
2017	Clorofila	T0	40,72	40,72	44,96a	46,90a	44,89a
		T1	39,44	39,44	41,76b	43,09ab	42,47ab
		T2	42,04	42,04	41,44b	43,44ab	41,38b
		T3	39,49	39,49	38,95b	39,82b	39,72b
	Flavonoles	T0	1,86	1,86	1,84	1,72	1,75
		T1	1,84	1,84	1,84	1,67	1,70
		T2	1,90	1,90	1,82	1,70	1,75
		T3	1,86	1,86	1,87	1,73	1,74
	Antocianinas	T0	0,090	0,090	0,098b	0,085b	0,098
		T1	0,090	0,090	0,103b	0,092b	0,099
		T2	0,091	0,091	0,108b	0,086b	0,102
		T3	0,091	0,091	0,112a	0,106a	0,109
2018	Clorofila	T0	38,59	43,63	46,11	42,47	47,67
		T1	38,66	43,26	44,95	39,14	45,11
		T2	37,60	42,82	45,22	38,57	45,23
		T3	38,21	42,41	43,65	39,08	44,62
	Flavonoles	T0	1,79	1,80b	1,82	1,79	1,71
		T1	1,80	1,83ab	1,85	1,82	1,70
		T2	1,81	1,82ab	1,85	1,83	1,71
		T3	1,83	1,85a	1,86	1,83	1,75
	Antocianinas	T0	0,082	0,068	0,082	0,050	0,089
		T1	0,080	0,067	0,083	0,043	0,091
		T2	0,086	0,073	0,095	0,049	0,099
		T3	0,083	0,070	0,091	0,047	0,099
2019	Clorofila	T0	42,15	44,51	45,83a	44,11	48,76
		T1	41,46	44,45	44,99a	43,83	52,26
		T2	43,99	44,54	45,85a	42,87	50,74
		T3	42,70	42,63	42,456b	39,54	49,05
	Flavonoles	T0	1,79	1,77	1,77	1,80	1,64
		T1	1,86	1,76	1,79	1,79	1,62
		T2	1,81	1,82	1,80	1,82	1,65
		T3	1,83	1,82	1,79	1,77	1,61
	Antocianinas	T0	0,081	0,077	0,071	0,091	0,122
		T1	0,092	0,077	0,080	0,090	0,113
		T2	0,081	0,079	0,079	0,098	0,112
		T3	0,086	0,083	0,081	0,108	0,120
Media	Clorofila	T0	40,25	44,23a	45,63	44,60a	47,11
		T1	39,40	43,49ab	43,90	42,02b	46,61
		T2	40,70	43,67ab	44,51	41,40bc	46,33
		T3	39,62	42,21b	41,69	39,48c	44,47
	Flavonoles	T0	1,81	1,79b	1,81	1,77	1,70
		T1	1,83	1,80ab	1,83	1,76	1,67
		T2	1,84	1,84a	1,82	1,79	1,70
		T3	1,84	1,83ab	1,84	1,78	1,70
	Antocianinas	T0	0,085	0,079	0,083	0,076	0,103
		T1	0,086	0,078	0,089	0,075	0,101
		T2	0,086	0,081	0,092	0,076	0,105
		T3	0,087	0,083	0,095	0,087	0,109

La restricción de riego impuesta en los tratamientos RDC causó disminución significativa ( $p < 0,05$ ) en la concentración de clorofilas en los años “On” (2017 y 2019) entre el tratamiento control y T3 de un 13% y un 7% en 2017 y 2019 respectivamente en la fecha de máximo estrés de T3 (Tabla 4.3.2.1). La reducción media ( $p < 0,05$ ) de concentración de clorofilas en hoja de T3 con respecto al control al final de la fase II fue de 4,6% (Tabla 4.3.2.1). Por otro lado, el estrés hídrico aumentó significativamente ( $p < 0,05$ ) la concentración de flavonoles en hoja de T2 con respecto al control un 2,8% al final de fase II (Tabla 4.3.2.1).

### 4.3.3. Crecimiento

La Tabla 4.3.3.1 muestra el tamaño de los árboles expresado en el área de la proyección ortogonal de la copa ( $m^2$ ) y las medidas de dispersión. Los árboles no mostraron una respuesta de crecimiento diferenciada debido a los diferentes tratamientos de riego tras tres años de estudio (Tabla 4.3.3.1).

Tabla 4.3.3.1. Área de la copa ( $m^2$ ) y medidas de dispersión

Año	Tratamiento	Área de Copa ( $m^2$ )	CV (%)	Desv. Típica
2019	T0	12	32	3,84
	T1	11	23	2,56
	T2	10	33	3,44
	T3	13	21	2,74

### 4.3.4. Producción, peso de fruto y número de frutos por árbol.

La Tabla 15 muestra la cantidad de cosecha expresada en producción por árbol ( $Kg \text{ árbol}^{-1}$ ), peso de un fruto en verde ( $g \text{ fruto}^{-1}$ ) y número de frutos por árbol (N. frutos) de los cuatro tratamientos estudiados, durante los cuatro años de estudio 2017, 2018, 2019 y 2020 y la media global de los cuatro años.

En el año 2017, la cosecha por árbol osciló entre 21,92 y 23,37  $kg \text{ árbol}^{-1}$  en T2 y T0 respectivamente. El peso de un fruto osciló entre 2,62 y 2,76  $g \text{ fruto}^{-1}$  en T1 y T0 respectivamente. El número de frutos por árbol osciló entre 7.887 y 8.819 frutos  $\text{árbol}^{-1}$  en T2 y T1 respectivamente. No se observaron diferencias significativas en ninguno de los parámetros estudiados.

En el año 2018, la cosecha por árbol osciló entre 10,31 y 20,12 kg árbol<sup>-1</sup> en T0 y T1 respectivamente. Un fruto pesó entre 2,77 y 3,11 g fruto<sup>-1</sup> en T2 y T1 respectivamente, y la carga frutos en un árbol osciló entre 3.209 y 6.270 frutos árbol<sup>-1</sup> en T0 y T1 respectivamente. No se observaron diferencias significativas.

En el año 2019 la producción por árbol osciló entre 15,70 y 22,03 kg árbol<sup>-1</sup> en T2 y T1 respectivamente. Un fruto pesó entre 2,59 y 2,90 g fruto<sup>-1</sup> en T0 y T1 respectivamente y la carga de un árbol varió entre 5.150 y 8.158 frutos árbol<sup>-1</sup> valores observados en T2 y T1 respectivamente. No se observaron diferencias significativas.

En el año 2020 la producción por árbol varió entre 15,64 y 25,58 kg árbol<sup>-1</sup> en los tratamientos T2 y T1 respectivamente. Un fruto pesó entre 3,05 y 3,45 g fruto<sup>-1</sup> valores observados en T2 y T0 respectivamente. El número de frutos por árbol estuvo entre 4.503 y 7.955 frutos árbol<sup>-1</sup> en T0 y T1 respectivamente. No se observaron diferencias significativas.

La producción media por árbol de los cuatro años de estudio osciló entre 15,43 y 22,71 kg árbol<sup>-1</sup> en T2 y T1 respectivamente. Esta diferencia fue significativa, entre sí. Las producciones de los otros dos tratamientos no tuvieron diferencias significativas con ninguno de estos dos valores. Un fruto pesó de media entre 2,86 y 2,95 g fruto<sup>-1</sup> en T2 y T0 respectivamente. La carga de un árbol osciló entre 5.112 y 7.785 frutos árbol<sup>-1</sup> en T2 y T1 respectivamente.

Tabla 4.3.4.1. Cantidad de cosecha, expresado en cosecha por árbol (kg árbol<sup>-1</sup>), peso medio de un fruto entero (g fruto<sup>-1</sup>) y número total de frutos en un árbol (N. frutos), de los cuatro tratamientos estudiados T0 (control), T1, T2 y T3 en los cuatro años de estudio, 2017, 2018, 2019 y 2020 y la media de los cuatro años de estudio. Las letras marcan diferencias significativas (p<0,05).

Año	Tratamiento	Cosecha (Kg árbol <sup>-1</sup> )	Peso fruto (g fruto <sup>-1</sup> )	N. frutos
2017	T0	23,37	2,76	8450
	T1	23,10	2,62	8819
	T2	21,92	2,76	7887
	T3	22,52	2,69	8306
2018	T0	10,31	2,95	3209
	T1	20,12	3,11	6270
	T2	10,62	2,77	3493
	T3	13,33	2,83	4631
2019	T0	18,68	2,59	7224
	T1	22,03	2,90	8158
	T2	15,70	2,81	5150
	T3	20,21	2,82	7274
2020	T0	16,17	3,45	4503
	T1	25,58	3,16	7955
	T2	15,64	3,05	4848
	T3	16,81	3,12	5419
Media	T0	17,13 <sup>ab</sup>	2,95	5802 <sup>b</sup>
	T1	22,71 <sup>a</sup>	2,95	7785 <sup>a</sup>
	T2	15,43 <sup>b</sup>	2,86	5112 <sup>b</sup>
	T3	18,22 <sup>ab</sup>	2,87	6407 <sup>ab</sup>

#### 4.3.5. Calidad de cosecha.

La Tabla 4.3.5.1 muestra el porcentaje en peso seco de pistachos abiertos, cerrados y vacíos, el calibre de los pistachos abiertos, el peso fresco y seco de la semilla de los frutos abiertos y el peso fresco y seco de la semilla de los frutos cerrados.

En el año 2017 el porcentaje de frutos abiertos osciló entre 69 y 91% en T3 y T0 respectivamente, el porcentaje de frutos cerrados entre el 4 y el 25 % en T2 y T3 respectivamente y el porcentaje de vacíos entre el 2 y 5% en T0 y el resto de tratamientos respectivamente. Se observaron diferencias significativas en el porcentaje de frutos abiertos y cerrados debidas al tratamiento de riego. T3 mostró un porcentaje de fruto abierto significativamente más bajo que el resto de tratamientos y un porcentaje de fruto cerrado significativamente más alto (p<0,05) que el resto de tratamientos (Tabla 4.3.5.1). El calibre de los frutos oscilo entre 18,59 y 19,05 mm en T1 y T2 respectivamente. El peso fresco y seco de la semilla

de los frutos abiertos osciló entre 0,92 y 1,01 g en T1 y T2 respectivamente en fresco y entre 0,54 y 0,63 g en T3 y T2 respectivamente en peso seco. El peso de la semilla de los frutos cerrados osciló entre 0,86 y 1,00 g en T0 y T3 respectivamente en fresco y entre 0,52 y 0,58 g en T1 y T3 respectivamente en peso seco (Tabla 4.3.5.1). No se observaron diferencias significativas debidas al tratamiento de riego en calibre y peso fresco y seco de las semillas de los frutos abiertos y cerrados.

En el año 2018 el porcentaje de frutos abiertos osciló entre 48 y 63% en T3 y T0 respectivamente, el porcentaje de frutos cerrados entre 34 y 50% en T0 y T3 respectivamente y el porcentaje de frutos vacíos entre el 1 y el 3% en T1 y T0 respectivamente. El calibre de los frutos abiertos varió entre 18,56 y 19,54 mm en T2 y T1 respectivamente (Tabla 4.3.5.1). El peso de la semilla de los frutos abiertos osciló entre 1,03 y 1,21 g en T2 y T1 respectivamente en peso fresco y entre 0,61 y 0,68 g en T2 y T1 respectivamente en peso seco (Tabla 4.3.5.1). El peso de la semilla de los frutos cerrados osciló entre 1,07 y 1,32 g en T2 y T0 respectivamente en fresco y entre 0,56 y 0,67 g en T2 y T1 respectivamente en peso seco (Tabla 4.3.5.1). No se observaron diferencias significativas debidas al tratamiento de riego para ninguno de los parámetros medidos (Tabla 4.3.5.1).

En el año 2019, el porcentaje de pistachos abiertos, cerrados y vacíos osciló entre 67 y 78%, 22 y 33% para T0 y T3 en abiertos y cerrados respectivamente, y entre el 3 y 5% en T0 y T3 respectivamente de pistachos cerrados. T0 tuvo significativamente ( $p < 0,05$ ) menor porcentaje de pistachos abiertos y el mayor porcentaje de pistachos cerrados (Tabla 4.3.5.1). El calibre de los frutos abiertos osciló entre 19,8 y 20,58 mm en T2 y T0 respectivamente. T0 presentó pistachos con un calibre significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que T2. El peso de la semilla de los frutos abiertos osciló entre 0,97 y 1,2 g en T0 y T2 respectivamente en peso fresco y entre 0,61 y 0,66 g en T3 y T1 respectivamente en peso seco. El peso de semilla de fruto abierto en peso fresco de T2 fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que el peso de los frutos de T0 (Tabla 4.3.5.1). Las semillas de los frutos cerrados pesaron entre 1,00 y 1,13 g en T0 y T2 respectivamente en fresco y entre 0,55 y 0,62 g en T3 y T2 respectivamente tras ser secadas en estufa (Tabla 4.3.5.1).

En el año 2020 el porcentaje de frutos abiertos varió entre 39 y 75% en T3 y T0 respectivamente. T0, T1 y T2 mostraron un porcentaje significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que T3 (Tabla 4.3.5.1). El porcentaje de frutos cerrados osciló entre 23 y 53% en T0 y T3 respectivamente. El porcentaje de frutos cerrados fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en T3 que en los otros tres tratamientos estudiados (Tabla 16). El porcentaje de frutos vacíos osciló entre el 2 y 8% en T1 y

T3 respectivamente. El porcentaje de frutos vacíos de T2 y T3 fue significativamente más alto ( $p < 0,05$ ) que los otros dos tratamientos estudiados (Tabla 4.3.5.1). El calibre de los frutos abiertos osciló entre 18,91 y 20,54 mm en T3 y T0 respectivamente. Las semillas de los frutos abiertos pesaron entre 1,26 y 1,42 g en T3 y T1 respectivamente en peso fresco y entre 0,72 y 0,81 g en T3 y T1 respectivamente en peso seco (Tabla 4.3.5.1).

La media de los cuatro años de estudio resultó en un porcentaje de frutos abiertos que osciló entre 58 y 74% en T3 y T0 respectivamente. El porcentaje de frutos abiertos fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en T0, T1 y T2 que en T3 (Tabla 4.3.5.1). El porcentaje de frutos cerrados varió entre 24 y 38% en T0 y T3 respectivamente. El porcentaje medio de frutos cerrados fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en T3 que en T0, T1 y T2 (Tabla 4.3.5.1). El calibre de los frutos osciló entre 19,20 y 19,70 mm en T3 y T0 respectivamente. El peso medio de la semilla de los frutos abiertos estuvo entre 1,10 y 1,18 g en T0 y T1 respectivamente en peso fresco y entre 0,63 y 0,69 g en T3 y T1 respectivamente en peso seco (Tabla 4.3.5.1). El peso medio de la semilla de frutos cerrados osciló entre 1,10 y 1,13 g en T3 y T0 respectivamente en fresco y entre 0,60 y 0,62 g en T3 y T2 respectivamente en peso seco (Tabla 4.3.5.1).

Tabla 4.3.5.1. Calidad de cosecha expresada en porcentaje de frutos abiertos, cerrados y vacíos (%), calibre de fruto (mm), peso fresco de la semilla de frutos abiertos (PFS)(g), peso seco de la semilla de frutos abiertos (PSS abiertos)(g), peso fresco de la semilla de frutos cerrados (PFS cerrados)(g), peso seco de la semilla de frutos cerrados (PSS cerrados) (g), ratio semilla/fruto de frutos abiertos y ratio semilla fruto de frutos cerrados, de los cuatro tratamientos de riego T0, T1, T2 y T3 en los cuatro años de estudio y la media de los cuatro años.

Año	Tratamiento	Porcentaje en peso seco (%)				Calibre	PFS abierto (g)	PSS abierto (g)	PFS cerrado (g)	PSS cerrado (g)	Ratio semilla/fruto abierto	Ratio semilla/fruto cerrado
		Abiertos	Cerrados	Vacíos								
2017	T0	91a	7b	2	18,77	0,94	0,61	0,86	0,55	0,518	0,535	
	T1	88a	7b	5	18,59	0,92	0,59	0,86	0,52	0,533	0,595	
	T2	90a	4b	5	19,05	1,01	0,63	0,89	0,57	0,556	0,571	
	T3	69b	25 <sup>a</sup>	5	18,66	0,93	0,54	1,00	0,58	0,551	0,604	
2018	T0	63	34	3	19,01	1,10	0,64	1,32	0,60	0,563	0,570	
	T1	49	49	1	19,54	1,21	0,68	1,24	0,67	0,569	0,553	
	T2	63	36	1	18,56	1,03	0,61	1,07	0,56	0,548	0,542	
	T3	48	50	2	19,17	1,15	0,66	1,08	0,58	0,572	0,541	
2019	T0	67b	33 <sup>a</sup>	3	20,58a	0,97b	0,62	1,00	0,58	0,527	0,546	
	T1	75ab	25ab	3	20,17ab	1,18a	0,66	1,12	0,57	0,592	0,621	
	T2	77a	23b	3	19,80b	1,20a	0,63	1,13	0,62	0,631	0,592	
	T3	78a	22b	5	20,01ab	1,08ab	0,61	1,01	0,53	0,578	0,631	
2020	T0	75a	23b	3b	20,54	1,39	0,79	1,32	0,70	0,589b	0,565	
	T1	62a	36b	2b	19,92	1,42	0,81	1,25	0,66	0,604ab	0,554	
	T2	66a	27b	7a	19,36	1,30	0,74	1,31	0,70	0,608a	0,578	
	T3	39b	53 <sup>a</sup>	8a	18,91	1,26	0,72	1,32	0,70	0,601ab	0,568	
Media	T0	74a	24b	3a	19,70	1,10	0,67	1,13	0,61	0,550	0,554	
	T1	69a	29ab	3a	19,56	1,18	0,69	1,13	0,61	0,574	0,580	
	T2	72a	24b	4ab	19,20	1,14	0,65	1,12	0,62	0,589	0,571	
	T3	58b	38 <sup>a</sup>	5b	19,20	1,11	0,63	1,10	0,60	0,576	0,585	

#### 4.3.6. Coeficientes de variación de la producción.

La Tabla 4.3.6.1 muestra las medidas de dispersión de la producción en cada uno de los cuatro años de estudio y la media global. Las medidas de dispersión fueron mayores en los años “Off” que en los años “On”.

Tabla 4.3.6.2. Medidas de dispersión de la producción por árbol en los cuatro años de estudio donde CV (coeficiente de variación), varianza, desv. Típica (desviación típica) y rango para cada uno de los años de estudio y la media global.

Año	Tratamiento	CV	Varianza	Desv. Típica	Rango
2017	T0	32	55,33	7,44	24,85
	T1	38	75,14	8,67	19,65
	T2	48	111,54	10,56	24,45
	T3	35	60,52	7,78	17,86
2018	T0	94	93,44	9,67	29,60
	T1	52	109,07	10,44	29,35
	T2	127	181,97	13,49	36,05
	T3	66	76,54	8,75	22,30
2019	T0	35	41,04	6,41	19,97
	T1	35	69,90	8,36	17,65
	T2	45	41,12	6,41	17,67
	T3	28	31,65	5,63	14,21
2020	T0	74	141,93	11,91	34,04
	T1	54	194,15	13,93	31,66
	T2	97	230,83	15,19	41,52
	T3	25	17,60	4,20	10,40
Media	T0	59	99,53	9,98	37,56
	T1	44	102,97	10,15	35,35
	T2	79	143,74	11,99	43,58
	T3	40	53,11	7,29	26,15

## 5. Discusión

### 5.1. Caracterizar las respuestas del pistachero, comparando el efecto del patrón cuando se aplica el estrés en condiciones contraladas (Ensayo 1).

El patrón generó importantes diferencias en el potencial hídrico de la variedad. Estas diferencias aparecieron tanto en ausencia de estrés como cuando las plantas se sometieron a un estrés hídrico elevado (Figura 4.1.1).

En ausencia de estrés (tratamiento control) el patrón PT dio lugar a potenciales hídricos más bajos que el patrón PA y sobre todo que el patrón UCB. Estos efectos del patrón en las plantas control fueron más evidentes en las medidas realizadas en el segundo muestreo (final del periodo de estrés) y sobre todo en el tercero (final del periodo de recuperación). El patrón PT generó una respuesta de tipo constitutivo que hizo disminuir el potencial hídrico de la variedad no sometida a estrés hídrico. Cabe esperar que, en ausencia de estrés, o con niveles de estrés moderados, la variedad Kerman sea más productiva sobre los patrones PA y UCB que sobre el patrón PT. Las respuestas de tipo adaptativo, en general, afectan a la productividad bajo condiciones de estrés pronunciadas, mientras que los rasgos constitutivos, como los observados, también influyen en las producciones con niveles de estrés bajos y moderados (Tuberosa, 2012; Kumar *et al.*, 2017).

Cuando las plantas se sometieron a estrés, con independencia del patrón utilizado, mostraron potenciales hídricos significativamente más bajos que las plantas control, tanto al inicio del periodo de estrés como al finalizar el mismo.

Al finalizar el periodo de estrés, los potenciales hídricos llegaron hasta -4.50 MPa en las plantas injertadas sobre PT (frente a -4,10 y -3,60 MPa en las plantas injertadas sobre PA y UCB-1 respectivamente). Los potenciales hídricos alcanzados fueron inferiores a los que cabría esperar para una concentración de 200 g l<sup>-1</sup> de PEG 6000 en la solución nutritiva, que en agua destilada daría un potencial osmótico de  $\Psi_s$  cercano a -2.5 MPa. El agua utilizada tuvo una CE de 1 dS m<sup>-2</sup> y con la adición de las sales de la solución Hoagland, alcanzó a una CE final de 3.5 dS m<sup>-2</sup>. Esto influyó en los valores de potencial hídrico. En cualquier caso, los valores de potencial hídrico alcanzados fueron adecuados para estudiar las

respuestas de una especie como el pistacho que tolera potenciales de hasta -5 y -6 MPa (Walker *et al.*, 1998).

Cuando se sometieron a estrés las plantas injertadas sobre PT también mostraron potenciales hídricos significativamente más bajos que las plantas injertadas sobre PA y UCB-1. Esto se observó tanto al final del periodo de estrés como tras el periodo de recuperación (Fig. 4.1.1). Otros autores (Gijon *et al.*, 2010; Moriana *et al.*, 2018) también observaron que en condiciones de estrés el patrón PT da lugar a potenciales más bajos que los patrones PA o UCB-1. Estos potenciales hídricos bajos pueden considerarse un rasgo de tolerancia al estrés hídrico (Esmailpour *et al.*, 2015). El periodo de recuperación fue relativamente rápido, e inferior a los 40 días que reportaron Memmi *et al.* (2016b). Tras los 14 días del periodo de recuperación no hubo diferencias entre el potencial hídrico de las plantas sometidas a estrés y las plantas control, y se mantuvieron diferencias entre los patrones.

El patrón PT es el menos vigoroso de los tres y tiene cierto carácter enanizante (Guerrero *et al.*, 2002; Arpazi *et al.*, 2014). Es habitual que las plantas injertadas sobre patrones con estas características tengan valores de potencial hídrico más bajos que las plantas injertadas sobre patrones vigorosos (Atkinson *et al.*, 2003; Motisi *et al.*, 2004)

Las plantas injertadas sobre UCB-1 mostraron mayor capacidad de intercambio gaseoso, incluso bajo condiciones de estrés (Tabla 4.1.2.1). Esto se relaciona con un mayor crecimiento de las plantas (Fig. 4.1.5.1). Las plantas de mayor tamaño tienen una mayor producción potencial (Gijon *et al.*, 2010). Cuando se sometieron a estrés, las plantas injertadas sobre UCB-1 son las que menos redujeron su A con respecto al control (Tabla 4.1.2.1). Las plantas capaces de mantener mayor capacidad fotosintética bajo condiciones de estrés tienen mejor resistencia al mismo (Ranjbarfordei *et al.*, 2001).

Las plantas injertadas sobre UCB-1 tuvieron significativamente mayor eficiencia de carboxilación (Tabla 4.1.3.1). Esta mayor capacidad de la enzima Rubisco para convertir CO<sub>2</sub> en glúcidos, unido a mayor A y g<sub>s</sub>, sugieren que UCB-1 confiere a la variedad injertada un aumento del potencial fotosintético neto (Cao *et al.*, 2023; Iacono *et al.*, 1998). Las plantas injertadas sobre PT mostraron mayor aumento de WUE bajo condiciones de estrés (Tabla 4.1.3.1). El aumento de WUE bajo condiciones de estrés pudo ser debido a la disminución de la E (Tabla 4.1.3.1) y es una característica constitutiva que se confiere a la variedad injertada (Nezami *et*

*al.*, 2021). El aumento de WUE bajo condiciones de estrés debido a una disminución de E de las plantas injertadas sobre PT puede ser debido al carácter enanizante de dicho patrón. Una disminución de E produce una reducción directamente proporcional de crecimiento (Blum *et al.*, 2009).

Las plantas injertadas sobre PT mostraron menor concentración de clorofilas debidas al estrés (Fig. 4.1.4.1). La clorofila juega un papel importante en el mantenimiento de la capacidad fotosintética y es uno de los principales mecanismos para reducir los efectos del estrés hídrico (Esmailpour 2015; Nezami *et al.*, 2021). Las plantas injertadas sobre PT mostraron mayor concentración de flavonoles incluso en condiciones control, lo que supone una adaptación constitutiva al estrés hídrico (Kumar *et al.* 2017). Cuando las plantas fueron sometidas a estrés, las plantas injertadas sobre UCB-1 son las que más aumentaron la concentración de flavonoles en hoja con respecto al control (Fig. 4.1.4.2). Este aumento de la síntesis de compuestos fenólicos, estimulada por estreses bióticos y abióticos, supone una respuesta adaptativa que confiere el patrón a la variedad (Parida 2004; Kumar *et al.*, 2017). Estos compuestos fenólicos actúan como secuestradores/tampón de grupos reactivos oxidantes producidos como consecuencia del estrés (Grace & Logan, 2000). Algunos autores (Sanchez-Rodriguez *et al.*, 2011; Bürling 2013) observaron que, variedades de trigo y tomate catalogadas previamente como resistentes al estrés hídrico, fueron las que más aumentaron su concentración de estos compuestos bajo condiciones de estrés. Del mismo modo, las plantas sometidas a estrés injertadas sobre PA y UCB-1 son las que más aumentaron su concentración de antocianinas con respecto al control (Fig. 4.1.4.3). Las antocianinas, que también son compuestos fenólicos, actúan como secuestradores de grupos reactivos oxidantes, protegiendo la maquinaria fotosintética (Chalker-Scott 1999; Kumar *et al.*, 2017). Los portainjertos que inducen mayor síntesis de estos compuestos bajo condiciones de estrés, confieren a la variedad injertada una adaptación como respuesta al estrés (Kumar *et al.*, 2017, Nezami *et al.*, 2012).

Las plantas que más crecieron tanto sin limitación de riego como en condiciones de riego restringido fueron las plantas injertadas sobre UCB-1 (Fig. 4.1.5.1). Este portainjerto puede ser el que confiera a la variedad injertada un mayor potencial productivo en condiciones de estrés leve o moderado, así como unas condiciones productivas más estables en condiciones control (Gijon *et al.*, 2010; Esmailpour 2015). Las plantas que más redujeron su área foliar como consecuencia del estrés hídrico fueron las injertadas sobre UCB-1 (Fig. 4.1.5.3). La inhibición del

crecimiento de la hoja en condiciones de disponibilidad de agua limitada es una característica morfo-fisiológica adaptativa al estrés que permite reducir el área evaporativa de la planta, disminuyendo así pérdidas de agua por unidad de superficie (Kumar *et al.*, 2017; Alvarez *et al.*, 2018).

## **5.2. Caracterizar las respuestas del pistachero, comparando el efecto del patrón cuando se aplica el estrés en condiciones de campo (Ensayo 2).**

### **5.2.1. Parámetros de estrés.**

El patrón tuvo efecto en la respuesta de Kerman en  $g_s$ , E (Tabla 4.2.2.1), concentración de clorofilas, flavonoles y antocianias (Tabla 4.2.3.1).

PA fue el patrón que indujo mayor conductancia estomática a la variedad Kerman (Tabla 4.2.2.1). PT y UCB-1 no indujeron la misma conductancia estomática (Tabla 4.2.2.1). Estos resultados difieren con lo observado en maceta, donde UCB-1 fue el patrón que indujo mayor conductancia estomática (Moriana *et al.*, 2018). Por el contrario, los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con los obtenidos por Gijon *et al.*, 2010, donde en una comparativa de planta en maceta de *P. vera* L. cv. Kerman sobre PT y PA, PA fue el patrón que indujo mayor  $g_s$ . Germana 1996, comparó plantas de *Pistacia vera* L. cv. Nostrale injertadas sobre *P. terebinthus* y *P. atlantica* en secano y regadío. En su estudio observo que el patrón tenía un efecto en las plantas en secano. Las plantas injertadas sobre PA mostraron mayor transpiración que las injertadas sobre PT, lo que coincide con nuestros resultados PA indujo mayor transpiración que UCB-1 y UCB-1 mayor que PT (Tabla 4.2.2.1). Los resultados concuerdan con lo observado en campo por Germana (1996), que observó que PA inducía mayor E que PT. La transpiración (E), esta correlacionada con la conductancia estomática ( $g_s$ ) (Germana, 1996).

Las plantas injertadas sobre *P. atlantica* y sobre UCB-1 tuvieron una mayor transpiración ( $p < 0,05$ ) que las injertadas sobre *P. terebinthus* (Tabla 4.2.2.1). Este resultado sugiere que el cultivar Kerman tiene una mayor capacidad de intercambio gaseoso cuando está injertada sobre *P. atlantica* y UCB-1, que cuando está injertada sobre *P. terebinthus* (Germana, 1996). Mayor intercambio gaseoso se relaciona con un mayor crecimiento de las plantas. En efecto, UCB-1 indujo un

mayor desarrollo, con mayor diámetro de portainjerto y mayor área y volumen de copa, que el resto de portainjertos (Tabla 4.2.3.1).

El riego mantuvo las plantas en potenciales hídricos más altos. No obstante, a pesar del riego, no consiguieron situarse en valores por debajo de -1,50 MPa, límite sugerido previamente como umbral de estrés en el cultivo del pistacho (Shackel *et al.*, 1997; Memmi *et al.*, 2016). Estos resultados sugieren que las plantas en regadío pudieron estar sometidas a un estrés moderado a pesar del riego. Las adaptaciones al estrés hídrico pueden clasificarse como características constitutivas (expresadas también en condiciones de riego total o control) o como respuesta del estrés (solo expresadas bajo condiciones de estrés hídrico) (Boopathi *et al.*, 2012). Por lo que, es probable que tanto en regadío como las plantas en secano desarrollaran mecanismos de defensa al estrés que llegasen a afectar al potencial hídrico xilemático.

PT indujo mayor concentración de clorofila que los otros dos patrones estudiados (Tabla 4.2.3.1). Estos resultados difieren de los obtenidos por (Fernandez-Suela *et al.*, 2023), donde tanto en condiciones de estrés moderado como en condiciones de estrés severo, PT fue el patrón que indujo menor concentración de clorofilas.

La degradación de clorofilas debidas al estrés hídrico ha sido citada por diversos autores (Esmailpour 2015, Khoyardi *et al.*, 2016). Las plantas en condiciones de secano mostraron menor concentración de clorofila ( $p < 0,05$ ) que las regadas. Para unas mismas condiciones hídricas, el portainjerto indujo unos mayores niveles de clorofila en hoja, protegiendo a la planta de la degradación de las mismas. Las plantas injertadas sobre *P. terebinthus* tuvieron mayor concentración de clorofila que las plantas injertadas sobre *P. atlantica* (Tabla 4.2.3.1). UCB-1 fue el portainjerto en el que se redujeron menos, a nivel porcentual, los niveles de clorofila (Tabla 4.2.3.1), lo que parece relacionado a un mecanismo para reducir los efectos del estrés hídrico (Nezami *et al.*, 2021).

En la primera medida realizada, las plantas injertadas sobre *P. atlantica* y sobre UCB-1 mostraron mayor concentración de flavonoles y antocianinas que las plantas injertadas sobre *P. terebinthus*, siendo esto una adaptación positiva como respuesta al estrés hídrico (Kumar *et al.*, 2017). Además, las plantas que más incrementaron su concentración de flavonoles con respecto al control, fueron las injertadas sobre *P. atlantica* (Fig. 4.2.3.1). De acuerdo a estos resultados, las plantas injertadas sobre *P. atlantica* mostraron mejor respuesta adaptativa al estrés hídrico que los otros dos patrones estudiados, siendo capaces de metabolizar

mayor cantidad de sustancias protectoras de la maquinaria fotosintética (Kumar *et al.*, 2017). Las plantas cultivadas en condiciones de secano tuvieron niveles de flavonoles significativamente más altos que las plantas cultivadas en regadío (Tabla 4.2.3.1). El estrés hídrico motivó una mayor síntesis de compuestos fenólicos, activada como consecuencia de estrés hídrico (Parida, 2004).

### 5.2.2. Crecimiento y Producción.

El patrón tuvo efecto sobre la variedad Kerman en el área de copa, volumen de copa (Tabla 4.2.3.1), la producción y el porcentaje de frutos cerrados (Tabla 4.2.5.1).

El patrón que más creció fue UCB-1, con un diámetro de tronco mayor (Tabla 4.2.3.1). Además, las plantas injertadas sobre UCB-1 tuvieron mayor área de la proyección de copa y mayor volumen de copa (Tabla 4.2.3.1). UCB-1 ha sido descrito como el patrón más vigoroso por varios autores (Ferguson & Haviland, 2016, Couceiro *et al.*, 2017, Moriana *et al.*, 2018). Ferguson & Haaviland 2016), quien ordenó a UCB-1 > *P. atlantica* > *P. terebinthus* en orden descendente de mayor a menor vigor. Estos resultados muestran, que la vigorosidad es transferida a la variedad (Tabla 4.2.3.1). Este mayor crecimiento de las plantas injertadas sobre UCB-1 también se observó en las plantas en secano (Tabla 4.2.3.1). De acuerdo a estos resultados, las plantas injertadas sobre UCB-1 pueden ser más tolerantes al estrés, ya que su crecimiento se vio menos afectado por la restricción de riego que las plantas injertadas sobre los otros portainjertos (Alvarez *et al.*, 2020).

El riego no influyó significativamente en el crecimiento de las plantas, tan solo el diámetro de tronco de la variedad, se vio incrementado significativamente ( $p < 0,05$ ) debido al riego (Tabla 4.2.3.1). Esto pudo ser debido a que, durante la fase de crecimiento vegetativo del pistachero, hay reserva de agua suficiente en el suelo como para abastecer el crecimiento de la planta, siendo inapreciable el efecto del riego en el crecimiento (Marino *et al.*, 2018). Mayor tamaño de planta, se traduce en mayor potencial productivo, ya que las plantas tienen mayor capacidad de asimilación (Gijon *et al.*, 2010).

El patrón tuvo un efecto sobre la producción y el porcentaje de frutos cerrados (Tabla 4.2.5.1). Las plantas regadas injertadas sobre *P. terebinthus* fueron las más productivas seguidas de las plantas injertadas sobre UCB-1 (Tabla 4.2.5.1). En el año 2023 las plantas estaban en su quinto verde. La variedad Kerman tiene un periodo juvenil más largo que otras variedades (Couceiro *et al.*, 2017). Por otro

lado, ha sido descrito por varios autores que *P. terebinthus* es un patrón que confiere cierta precocidad a la variedad (Couceiro *et al.*, 2017). Esto se confirmaría por los resultados obtenidos en este trabajo.

### **5.3. Comparativa de las respuestas del pistachero cuando el estrés se ha producido en condiciones controladas y en campo (Ensayo 1 y 2).**

Las plantas mostraron respuestas diferentes cuando el estrés se produjo en condiciones controladas o en campo. Los parámetros afectados fueron el potencial hídrico (Fig. 4.1.1 y 4.2.1.1), la conductancia estomática y la transpiración (Tabla 4.1.3.1 y Tabla 4.2.2.1), concentración de clorofilas (Fig. 4.1.4.1; Tabla 4.2.3.1), flavonoles (Fig. 4.1.4.2; Tabla 4.2.3.1) y antocianinas (Fig. 4.1.4.3; Tabla 4.2.3.1).

Si comparamos los niveles máximos de estrés, las plantas en condiciones controladas alcanzaron potenciales hídricos mucho más bajos que las plantas en campo (-4,01 *vs.* -2,3 MPa, Fig. 4.1.1 y 4.2.1.1).

El patrón no indujo una diferencia de potencial hídrico de tallo ni entre las plantas en regadío ni entre las plantas en secano (Fig. 4.1.1). Esto difiere con los resultados obtenidos en el ensayo 1 donde las plantas injertadas sobre PT mostraban unos potenciales más bajos que los de PA y UCB-1 a pesar del riego (Fig. 4.2.1.1).

En condiciones controladas, UCB-1 indujo mayor conductancia estomática a pesar del estrés, mientras que PA y PT indujeron conductancias similares (Tabla 4.1.3.1). Sin embargo, en campo, PA indujo mayor conductancia estomática. Germana, 1996 y Gijón *et al.*, 2010 observaron que PA inducía mayor  $g_s$  que PT en condiciones de secano, tanto en campo como en maceta respectivamente. Sin embargo, Memmi *et al.* 2016 y Moriana *et al.* 2018 observaron mayor conductancia de las plantas sobre PT que las injertadas sobre PA en condiciones de secano en campo y maceta respectivamente.

UCB-1 indujo mayor transpiración en condiciones controladas (Tabla 4.1.3.1). UCB-1 y PA indujeron mayor transpiración en condiciones de campo (Tabla 4.2.2.1). PT fue el patrón con menor transpiración en ambos ensayos. En general patrones poco vigorosos reducen el crecimiento de la variedad porque la conductividad hidráulica tanto de la raíz como del tallo (Ezzahouani and Williams, 1995; Atkinson, 2003; Motisi *et al.*, 2004).

PT fue el patrón que indujo mayor reducción de concentración de clorofilas en condiciones controladas (Fig. 4.1.4.1), mientras que fue el patrón con mayor concentración de estas en condiciones de campo (Tabla 4.2.3.1). PT indujo mayor concentración de flavonoles en condiciones controladas, pero fue UCB-1 el que más aumento la concentración de este pigmento con respecto al control en estas condiciones. Por el contrario, en campo, PA fue el patrón que más incremento la concentración de flavonoles en hoja debido al estrés hídrico (Tabla 4.2.3.1). PT indujo mayor concentración de antocianinas en condiciones controladas, pero en cambio fue el que tuvo menor concentración en campo (Tabla 4.2.3.1).

Las diferencias fisiológicas observadas entre un ensayo y otro, pudieron deberse a que la respuesta de los árboles al estrés hídrico puede variar según el momento de la aplicación, la intensidad del estrés y su duración (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010).

En algunas ocasiones se ha observado que la capacidad de adaptación al estrés hídrico mostrada en los ensayos realizados en condiciones controladas no fue mostrada en condiciones de campo. O lo contrario, que mecanismos de tolerancia observados en campo no aparecieron en condiciones de laboratorio. En algunos frutales se observaron mecanismos de tolerancia a la sequía como el ajuste osmótico y el incremento en la eficiencia en el uso del agua (WUE) que sólo se desarrollaron cuando el déficit hídrico se produjo de forma gradual y durante un periodo de tiempo prolongado, como sucede en condiciones de campo. Sin embargo, esos mecanismos de tolerancia al estrés hídrico no se expresaron cuando se realizaron ensayos en condiciones controladas (Arndt *et al.*, 2000; Torrecillas *et al.*, 2018). El caso contrario se observó en *Ziziphus mauritiana*, que tras un periodo de sequía de 100 días no mostró una disminución significativa del potencial hídrico ni acumulación desolutos, pero si mostró control estomático y ajuste osmótico en invernadero. Se trata de una especie que, en condiciones de campo, basó su adaptación a la sequía en un gran sistema radicular que permitió la evitación y no necesitó expresar mecanismos de tolerancia. Arndt *et al.* (2000) consideraron que es una adaptación única porque *Ziziphus mauritiana* exhibió tanto una estrategia para evitar la sequía como la capacidad de aclimatarse mediante osmorregulación activa, y esto explicaría su capacidad para habitar con éxito en ambientes áridos en todo el mundo.

UCB-1 fue el patrón que indujo mayor crecimiento en ambos ensayos, confirmándose lo descrito por autores, que sitúan a UCB-1 como el patrón más vigoroso (Couceiro *et al.*, 2018; Moriana *et al.*, 2018).

## **5.4. Estudio de estrategias RDC, comparativa de nuevos umbrales de potencial hídrico de tallo en fase II y periodo de estrés en fase III (Ensayo 3).**

### **5.4.1. Potenciales hídricos y riego aplicado.**

Durante los años de estudio se observó que se producía una caída brusca del potencial hídrico del tallo aproximadamente unos 60 días después de la plena floración, en la fase de desarrollo II (crecimiento del pericarpio) alcanzándose potenciales inferiores a -1,5 MPa. Un potencial de -1,5 es el límite marcado como inicio del estrés durante la fase III (cuajado y crecimiento del fruto) según Shackel *et al.* (1994) y Memmi *et al.* (2016). El descenso del potencial durante la fase de desarrollo II se ha observado en otros trabajos, si bien no afectó al intercambio gaseoso (Marino *et al.*, 2018) indicando que esta caída de potencial no se relacionaba con un mayor estrés de los árboles. Esto posibilita restringir el riego durante ese periodo sin generar efectos sobre la productividad. El descenso brusco del potencial en el tratamiento control en fase II, obligó, de acuerdo con el diseño del ensayo en relación con los potenciales hídricos, a aumentar la dosis de riego, de forma que en el tratamiento control el riego superó la de la ETc (Tabla 4.3.1.1).

Los tratamientos de RDC consiguieron un importante ahorro de agua con respecto al control. El ahorro fue de media un 37% para T1 y un 47% para T2. Fueron porcentajes de ahorro muy semejantes a los descritos por Memmi *et al.*, (2016) para límites de potencial hídrico de tallo semejantes en fase II y III. En el tratamiento T3, con potenciales más bajos (mayor nivel de estrés hídrico) el ahorro medio, respecto al control fue de un 67%.

### **5.4.2. Concentración en hoja de clorofila, Flavonoles y Antocianinas.**

Las restricciones de riego tuvieron efecto en la concentración de clorofila y antocianinas en el año 2017, en la concentración de flavonoles en el año 2018, en la concentración de clorofilas en el año 2019. La concentración de clorofilas se redujo significativamente ( $p < 0,05$ ) efecto de la restricción de riego en la media de los tres años estudiados. Este resultado coincide con lo observado por Esmaeilpour, 2015; Khoyerdi *et al.*, 2016.

### 5.4.3. Crecimiento de las plantas.

Las restricciones de riego no afectaron significativamente al crecimiento de las plantas (Tabla 4.3.3.1). Estos resultados difieren con los obtenidos por Memmi *et al.* 2016 donde observó disminución de las plantas con restricciones de RDC comparadas con el control. En los suelos de la plantación se midió una densidad muy alta de inóculo de *Verticillium*, entre 2 y 8 microesclerocios por gramo de suelo. El *Verticillium* puede causar una rápida desecación y muerte de una o más ramas principales, o del árbol entero, sobre todo al final de primavera o en el inicio del verano (Ferguson *et al.*, 2016). De hecho, en la plantación donde se realizó el estudio se detectó un árbol afectado por este tipo de *Verticillium* que acabó muriendo. Sin embargo, el *Verticillium* también cursa con otros síntomas que se conocen como “thin leaf decline”. En este caso la enfermedad avanza despacio y se caracteriza por una lenta pérdida de vigor, una reducción del crecimiento, de la producción y la reducción de la masa foliar, hasta que las hojas se acaban agrupando en grupos al final de las ramas y brotes (Fig. 5.4.3.1) (Epstein *et al.*, 2004). En la plantación existían varios individuos con esa sintomatología, por lo tanto, la ausencia de respuesta en el crecimiento al riego se justifica por la infección de la plantación.



Figura 5.4.3.1. Ejemplo de decaimiento provocado por verticilosis tipo “thin leaf decline” (tomado de Ferguson *et al.*, 2016).

#### 5.4.4. Cantidad de cosecha

Las restricciones del riego no afectaron significativamente a la cosecha (Tabla 2). Esto se ha observado también en otros ensayos de RDI, con pistacho. Memmi (2016) describió que reducciones del 40 % y el 45 % del riego respecto a la dotación necesaria para cubrir la ETc no afectaron de forma significativa a la producción (Memmi, 2016). En el presente ensayo una reducción de hasta el 67 % tampoco redujo la cosecha.

Son resultados que contrastan con los obtenidos por otros autores. Se han descrito incrementos de producción del 30 % con riegos suplementarios de tan solo un 10-15 % de la demanda evaporativa (Marino *et al.*, 2018) lo que indica una elevada capacidad de respuesta al riego para el pistacho. Por otra parte, en los trabajos clásicos sobre las necesidades hídricas del pistacho Goldhamer *et al.* (1983) y Goldhamer *et al.* (1985) observaron reducciones muy importantes de la producción con restricciones del riego del 30 % y 50 % de la ETc. En sus trabajos sobre RDI Goldhamer & Beede (2004) y Golhamer *et al.* (2005) señalaron que reducciones del consumo potencial de agua del 25-50 % en la fase II no afectaron a la producción, pero que para mantener las producciones era necesario evitar el estrés en fase III. En el tratamiento T3 del presente trabajo las reducciones en la dotación de riego fueron del 86 % en fase II y del 61 % en fase III, sin aparente efecto sobre la producción.

Los trabajos publicados sobre los efectos del RDI a nivel de producción resultan un tanto contradictorios. En el caso de nuestro trabajo la escasa respuesta obtenida para volúmenes de agua muy diferentes puede tener relación, al menos en parte, con la heterogeneidad y la escasa productividad de la plantación experimental.

La plantación utilizada era una plantación representativa de una gran parte de las plantaciones realizadas en nuestro país a finales de los años 90 principios de los 2000, sobre *P. terebinthus*. *P. terebinthus* es un patrón poco vigoroso, muy heterogéneo y con cierta capacidad enanizante (Arpaci *et al.*, 2014, Guerrero *et al.*, 2002 y 2004; Barone *et al.*, 1998). Como este patrón se propaga exclusivamente por semilla sus características pueden variar mucho con la procedencia del material (Guerrero *et al.*, 2002). Además, se detectó la presencia de *Verticillium dahliae* que pudo limitar las respuestas productivas. La plantación experimental, realizada en un suelo profundo y con elevado potencial productivo, **-tuvo una baja**

~~productividad tenía un potencial productivo bajo y -estuvo estaba~~ formada por árboles muy heterogéneos, con tamaños muy dispares, que generaron una alta variabilidad en los resultados (tabla 17). La producción media fue de 1200 kg de fruto seco por hectárea, notablemente inferior a la obtenida en los ensayos de riego deficitario de Goldhammer *et al.* (1985) o de Memmi *et al.* (2016) y a los obtenidos por Marino *et al.* (2018) con riego de apoyo.

#### 5.4.5. Calidad de cosecha.

De forma general cuanto mayor es el volumen de riego mayor es el porcentaje de frutos abiertos (Goldhammer *et al.* 1987; Kanber *et al.* 1993; Golhamer *et al.*, 2005), La relación entre el estrés hídrico y el porcentaje de frutos abiertos parece dependiente del estado de desarrollo del fruto en el que se produce el estrés. La reducción del riego durante la fase II de desarrollo, en los tratamientos T1 y T2, no afectó significativamente al porcentaje de frutos abiertos (Tabla 4.3.5.1). Goldhammer & Beede (2004) testaron una reposición de la ET<sub>c</sub> del 0, 25 y 50% durante la fase II y no observaron efectos sobre el porcentaje de frutos abiertos ni sobre peso de la semilla. Gijón *et al.* (2009) y Memmi *et al.* (2016) tampoco encontraron efectos del RDI sobre el porcentaje de frutos abiertos cuando la ET<sub>c</sub> en la fase III era totalmente repuesta. Sin embargo, una restricción del riego del 63 % en fase III, en el tratamiento T3 generó un menor porcentaje de frutos abiertos.

Hay varias hipótesis sobre los mecanismos que determinan la apertura del pistacho. La primera, sugiere que la apertura longitudinal se produce, principalmente, por fuerzas de empuje que realiza la semilla sobre la cáscara (Nevo *et al.*, 1974). Una segunda teoría es la expuesta por Crane & Iwakari (1983) y Crane (1986), quienes sugieren la acción de agentes bioquímicos que actuarían sobre la sutura ventral de la cáscara. La apertura se produciría por la disolución de la pectina y el alargamiento celular. Polito & Pinney (1999) propusieron otra teoría relacionada con el empuje de la semilla y la existencia de células “más débiles” en la sutura ventral. En nuestro trabajo no observamos diferencias significativas en el peso de la semilla de los frutos abiertos y el peso de la semilla de los frutos cerrados (Tabla 4.3.5.1), por otra parte, la ratio semilla fruto<sup>-1</sup> fue mayor en los pistachos cerrados que en los pistachos abiertos. Es probable que en

la apertura del fruto además de la fuerza de empuje afecte el estado de hidratación de las distintas partes del fruto (Goldhammer 2004).

El tratamiento T3 tuvo un porcentaje medio de frutos vacíos significativamente ( $p < 0,05$ ) mayor que T0 y T1, pero no fue significativamente diferente de T2. Los frutos vacíos pueden producirse en dos momentos diferentes del ciclo. El primero sucede durante el cuajado del fruto y es muy dependiente de que la planta tenga una buena fertilización de Boro. El segundo ocurre en julio, cuando el embrión comienza su división celular. El aborto de la semilla es más sensible al estrés hídrico que la apertura del fruto (Goldhammer *et al.*, 2005). Por lo que, el mayor porcentaje de frutos vacíos en T3 pudo ser una combinación de una menor cantidad de reservas del árbol, debido a varios años consecutivos de estrés hídrico, como a la reducción de riego durante la fase de llenado del fruto (Tabla 4.3.5.1).

El tratamiento de riego no afectó al calibre longitudinal de los frutos (Tabla 4.3.5.1). El crecimiento del tamaño de fruto se da durante la fase I, desde el cuajado del fruto hasta el inicio del endurecimiento de la cáscara (Couceiro *et al.*, 2017). Durante este periodo, los potenciales hídricos de los tratamientos no fueron muy bajos, dada la disponibilidad de agua en el suelo (Fig. 4.3.1.1).

## **5.5. Evaluación de la variación de clorofila y polifenoles en hoja como posibles indicadores de estrés de plantas de pistachero (Ensayo 1, 2 y 3).**

La concentración de clorofila disminuyó significativamente ( $p < 0,05$ ) a causa del estrés tanto en condiciones controladas como en campo (Fig. 10; Tabla 10; Tabla 13). Estudios previos han descrito esta disminución debido a una perturbación en su síntesis y/o a su degradación por enzimas como la clorofilasa (Khoyerdi *et al.*, 2016). Por otro lado, el uso de aparatos como el SPAD o la pinza DUALEX ha sido descrito por otros autores. Silva *et al.* 2007 uso la concentración de clorofilas medidas con SPAD como un medida rápida y sencilla en la selección de genotipos tolerantes a la sequía de caña de azúcar. Gekas *et al.* 2013 utilizó este tipo de medidas para la selección de líneas de maíz resistente a sequía. La concentración de flavonoles en hoja aumento significativamente a causa del estrés en condiciones controladas y en campo. Bürling 2013 utilizó estas medidas rápidas y no destructivas comprobando la variación en las concentraciones de clorofilas y

flavonoles en hoja para determinar si plantas de trigo sufrían estrés hídrico. Diago *et al.* 2016 demostró el uso de herramientas como DUALEX para medir el estado nutricional de viñas.

## 6. Conclusiones

1.1 Las respuestas de la variedad Kerman, tanto a nivel fisiológico como de crecimiento, se vieron afectadas por el estrés hídrico y el patrón. Los tres patrones mostraron diferencias en sus mecanismos de adaptación al estrés.

1.2 PT mostró adaptaciones constitutivas como la disminución del potencial hídrico de tallo en la variedad, que se observó tanto si las plantas estaban bien regadas como si estaban sometidas a estrés, alta concentración de antocianinas en hoja y cierre estomático. Estas características no resultan muy interesantes en condiciones productivas con niveles de estrés moderados, porque limitan la productividad aun con bajos niveles de estrés, pero si son interesantes en condiciones extremas de estrés.

1.3 Los patrones UCB-1 y PA mostraron características adaptativas al estrés, como aumento de la concentración de polifenoles en hoja o reducción del área foliar, lo que les permite mantener una tasa de metabolismo más alta y una mayor producción en condiciones moderadas de estrés.

2.1 La variedad Kerman creció más cuando estuvo injertada en UCB-1, tanto en condiciones de secano como en regadío.

2.2 En condiciones de riego, *Pistacia terebinthus* y UCB-1 mostraron un crecimiento similar, pero, la sensibilidad de *P. terebinthus* a *Verticillium* hace desaconsejable el uso de este patrón en regadío.

2.3 *Pistacia terebinthus* es el patrón que confiere mayor precocidad a la variedad Kerman.

3.1 La respuesta de las plantas al estrés hídrico fueron diferentes cuando el déficit de agua se produjo en condiciones controladas y cuando se produjo en un ensayo de campo. Las plantas del género *Pistacia* desarrollan un sistema radicular muy potente, que explora una gran cantidad de suelo tanto en los horizontes superficiales como en profundidad. Por ello en suelos profundos las plantas de pistacho parecen expresar, sobre todo, mecanismos de evitación y al menos, en las condiciones de suelo de nuestro ensayo de campo y con plantas juveniles, no

necesitaron expresar mecanismos de adaptación en la misma medida que lo hicieron en el ensayo en condiciones controladas.

4. La estrategia de riego deficitario controlado permitió reducir el consumo de agua en un 37% para T1. La reducción en el consumo de agua fue mayor cuando se impusieron restricciones de riego en los primeros quince días de la fase 3, un 47% para T2 y un 67% para T3 sin modificar de forma significativa la cantidad y la calidad de la cosecha. La ampliación del periodo de estrés 15 días más (T2) permitió un ahorro de agua del 15% de media, lo que se tradujo en 50mm menos anuales sin afectar significativamente a la producción, calidad de cosecha o crecimiento con respecto a T1. Por otro lado, umbrales más bajos (T3) resultaron en una dotación media anual de riego de 163 mm, cantidad que se asemeja mucho a las dotaciones hídricas concedidas al en gran parte de las zonas de cultivo.

5.1 La variación de la concentración de clorofila, flavonoles y antocianinas en hoja se mostraron como buenos indicadores para la detección de estrés en pistachero, tanto en condiciones de campo, como en condiciones controladas, tanto en plantas jóvenes como en plantas en plena producción con independencia del portainjerto utilizado.

5.2 *P. atlantica* y UCB1 indujeron una mayor concentración de flavonoles y clorofila en hoja ante una situación de estrés hídrico lo que les permite mantener una mayor capacidad productiva. En cambio *P. terebinthus* fue el portainjerto que indujo una menor concentración de flavonoles y de clorofila ante una situación de estrés.

5.3 El uso de la pinza Dualex, fácil de manejar y transportar, de medición rápida y no destructiva, resultó eficaz para detectar y evaluar estrés hídrico en pistachero.

## Referencias

- Ahmed, K., Munawar, S., & Mahmood, T. (2015). Biochemical analysis of some species of seaweeds from Karachi coastal area. *Fuuast journal of Biology*, 5(1), 43-45.
- Ak B.E. and Harada S. (2015) Pistachio production and industry in Turkey: curret status and future perspective. GREMPA Meeting. Meknes (Morocco) 12-14 May.
- Al-Saghir M.G. (2009) Evolutionary History of the Genus *Pistacia* (Anacardiaceae) *International Journal of Botany* 5: 255-250. DOI: 10.3923/ijb.2009.255.257 · Source: DOAJ
- Allan, C.J. (2015). Determining thermal unit requirements of three developmental stages of *Pistacia vera* ssp. Fruit growth. Thesis submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Master of Science in Horticulture and Agronomy in the Graduate Division of the University of California Davis.
- Alvarez, S.; Rodríguez, P.; Broetto, F.; Sánchez-Blanco, M.J. Long term responses and adaptive strategies of *Pistacia lentiscus* under moderate and severe deficit irrigation and salinity: Osmotic and elastic adjustment, growth, ion uptake and photo-synthetic activity. 2018 *Agric. Water Manag.* 202, 253–262.
- Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032.
- Anuario de Estadística Agraria. (2021) URL: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2022/default.aspx?parte=3&capitulo=07&grupo=10&seccion=5>.
- Arndt, S. K., Wanek, W., Clifford, S. C., & Popp, M. (2000). Contrasting adaptations to drought stress in field-grown *Ziziphus mauritiana* and *Prunus persica* trees: water relations, osmotic adjustment and carbon isotope composition. *Functional Plant Biology*, 27(11), 985-996.
- Arzani, K., Ghasemi, M., Yadollahi, A., & Hokmabadi, H. (2013). Study of foliar epidermal anatomy of four pistachio rootstocks under water stress. *Idesia (Chile)*, 31(1), 101-107.
- Atkinson, C. J., Else, M. A., Taylor, L., & Dover, C. J. (2003). Root and stem hydraulic conductivity as determinants of growth potential in grafted trees of apple (*Malus pumila* Mill.). *Journal of Experimental Botany*, 54(385), 1221-1229.
- Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7
- Aydin Y. and Pakyürek M. (2021) The importance of irrigation in pistachio and its historical development in Turkey. In: Pakyürek M. (Ed.) *Recent headwais in pomology*. İksad Publishing House. Ankara. ISBN: 978-625-7562-09-6.

- Azcón-Bieto, J., Lambers, H., & Day, D. A. (1983). Effect of photosynthesis and carbohydrate status on respiratory rates and the involvement of the alternative pathway in leaf respiration. *Plant physiology*, 72(3), 598-603.
- Begg, J. E., & Turner, N. C. (1970). Water potential gradients in field tobacco. *Plant Physiology*, 46(2), 343-346.
- Behboudian, M.H., Walker, R.R., Törökfalvy, E. 1986. Effects of water stress and salinity on photosynthesis on pistachio. *Sci. Hort.* 29, 251–261.
- Boopathi, 2012
- Bressan, A. G., Chiosi, C., & Bertelli, G. (1981). Mass loss and overshooting in massive stars. *Astronomy and Astrophysics*, 102, 25-30.
- Bürling, K., Cerovic, Z. G., Cornic, G., Ducruet, J. M., Noga, G., & Hunsche, M. (2013). Fluorescence-based sensing of drought-induced stress in the vegetative phase of four contrasting wheat genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 89, 51-59.
- Castel, J. R., & Fereres, E. (1982). Responses of young almond trees to two drought periods in the field. *Journal of Horticultural Science*, 57(2), 175-187.
- Cerovic, Z. G., Masdoumier, G., Ghazlen, N. B., & Latouche, G. (2012). A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia plantarum*, 146(3), 251-260.
- Chalker-Scott, L. (1999). Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. *Photochemistry and photobiology*, 70(1), 1-9.
- Chalker-Scott, L. (2002). Do anthocyanins function as osmoregulators in leaf tissues? *Advances in Botanical Research* 37, pp. 1-31
- Couceiro, J.F., Guerrero Villaseñor, J., Gijón, M.J., Moriana Elvira, A., Pérez López, D., Rodríguez de Francisco, M. 2017. El cultivo del pistacho. Editorial Mundiprensa.
- Crane, J. C., & Iwakiri, B. T. (1981). Morphology and reproduction of pistachio. *Horticultural reviews*, 3, 376-393.
- Crane, J. C., & Iwakiri, B. T. (1986). Pistachio yield and quality as affected by rootstock. *HortScience*, 21(5), 1139-1140.
- Darijani F., Veisi H., Liaghati H., Reza Nazari, M., Khoshbakht K.(2019) Assessment of Resilience of Pistachio Agroecosystems in Rafsanjan Plain in Iran. *Sustainability* 11, 1656; doi:10.3390/su11061656
- Diago, M. P., Rey - Carames, C., Le Moigne, M., Fadaili, E. M., Tardáguila, J., & Cerovic, Z. G. (2016). Calibration of non - invasive fluorescence - based sensors for the manual and on - the - go assessment of grapevine vegetative status in the field. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(3), 438-449.
- Diffenbaugh, N.S.; Pal, J.S.; Giorgi, F.; Gao, X. Heat Stress Intensification in the Mediterranean Climate. Change Hotspot. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34.

- Dutt SK, Bal AR, Bandyopadhyay AK (1991) Salinity induced chemical changes in *Casuarina equisetifolia* (Forst). *Egy J Soil Sci* 31:57–63
- Eliás-Castillo F & Gimenez Ortiz R, 1965. Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España. [Potencial Evapotranspiration and Water Balance in Spain] Dirección General de Agricultura, Ministerio de Agricultura Madrid.
- English, M., & Raja, S. N. (1996). Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 32(1), 1-14.
- Esmailpour, A., Van Labeke, M. C., Samson, R., & Van Damme, P. (2015a). Osmotic stress affects physiological responses and growth characteristics of three pistachio cultivars. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1-14.
- Esmailpour, A., Van Labeke, M. C., Samson, R., Ghaffaripour, S., & Van Damme, P. (2015b). Comparison of biomass production-based drought tolerance indices of pistachio (*Pistacia vera* L.) seedlings in drought stress conditions. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 7(2), 36-44.
- Ezzahouani, A., & Williams, L. E. (1995). The influence of rootstock on leaf water potential, yield, and berry composition of Ruby Seedless grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 46(4), 559-563.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Sustainable agriculture*, 153-188.
- Farquhar, G. D., & Sharkey, T. D. (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual review of plant physiology*, 33(1), 317-345.
- Fereres E., Soriano M.E. (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use, *Journal of Experimental Botany*, 58: 147–159, <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fereres, E., Goldammer, D. A., & Sadras, V. O. (2012). Yield response to water of fruit trees and vines: guidelines. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, (66), 246-497.
- Ferguson, L., Haviland, D.R. 2016. Pistachio Production Manual. University of California. Agricultural and Natural Resources. Publication 3545, 334 pp.
- Ferguson, L., Polito, V., & Kallsen, C. (2005). The pistachio tree; botany and physiology and factors that affect yield. *Pistachio production manual*, 4th ed. Davis, CA, USA, University of California Fruit & Nut Research Information Center, 31-39.
- Fernández-Suela, E., García-Estringana, P., de Andrés, E. F., Ramírez-Martín, N., & Alegre, J. (2023). Effects of Rootstock on Water Stress, Physiological Parameters, and Growth of the Pistachio Tree. *Horticulturae*, 9(12), 1305.
- Fischer, G.; Tubiello, F.N.; Van Velthuizen, H.; Wiberg, D.A. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2007, 74, 1083–1107.

- Galindo, A., Collado-González, J., Griñán, I., Corell, M., Centeno, A., Martín-Palomo, M. J., & Pérez-López, D. (2018). Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agricultural water management*, 202, 311-324.
- Gekas, F., Pankou, C., Mylonas, I., Ninou, E., Sinapidou, E., Lithourgidis, A., ... & Dordas, C. (2013). The use of chlorophyll meter readings for the selection of maize inbred lines under drought stress. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 7(8), 815-819.
- Germana, C. (1996, September). The response of pistachio trees to water stress as affected by two different rootstocks. In II International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 449 (pp. 513-520).
- Ghrab, M., Zribi, F., Chelli-Chaabouni, A., Gouta, H., & Ben Mimoun, M. (2010). Genetic diversity of pistachio in Tunisia. *Options Méditerranéennes, Série A*, 94, 221-228.
- Gijón, M.C., Gimenez, C., Perez-López, D., Guerrero, J., Couceiro, J. F., & Moriana, A. Rootstock influences the response of pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Kerman) to water stress and rehydration. 2010 *Sci. hort.*, 125(4), 666-671.
- Gijón, M.C., Guerrero, J., Cruceiro, J.F., Moriana, A., 2008. Deficit irrigation without reducing yield or nut splitting in pistachio (*Pistacia vera* cv Kerman on *Pistacia terebinthus* L.). *Agric. Water Manage.* 96, 12–22.
- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D. A., Johnson, R. S., & DeJong, T. M. (1993). Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(5), 580-586.
- Goldhamer, D. A., Intrigliolo, D. S., & Castel, J. R. LEAD AUTHOR. Pistachio. *In: Crop yield response to water*, FAO Irrigation and Drainage Paper, 66, pp. 485-.
- Goldhamer, D.A. 1995. Irrigation Management. In: Ferguson, L. (Ed.), *Pistachio Production Manual*. Davis, Center for fruit and nut research and information, pp. 71-81.
- Goldhamer, D.A., 2005. Tree water requirements and regulated deficit irrigation. In: Ferguson, L. (Ed.), *Pistachio Production Manual*, fourth edition. pp. 103–116.
- Goldhamer, D.A., Phene, B.C., Beede, R., Sherlin, L., Mahan, S., Rose, D., 1987. Effects of sustained deficit irrigation on pistachio tree performance. In: *Annual Report. Crop Year 1986–1987*. California Pistachio Industry, Fresno, pp. 61–66.
- Goldhamer, D.A., Beede, R.H., 2004. Regulated deficit irrigation effects on yield, nut quality and water-use efficiency of mature pistachio trees. *J. Hortic. Sci. Biol.* 79, 538–545.
- Goldhamer, D.A., Beede, R.H., Michailides, T.J., Salinas, M., Doster, M.A., 2005. Effects of regulated deficit irrigation on shell splitting and nut quality at harvest (second year report). In: *Annual Report. Crop Year 2004–2005*. California Pistachio Industry, 104–106.
- Goldhamer, D.A., Beede, R.H., Moore, J.M., Weinberger, G., Menezes Jr., J., 1983. Water use requirements and physiological response to water stress in pistachio. *Annual report of the California Pistachio Commission, Crop Year 1982 -1983*, pp. 53-57.

- Goldhamer, D.A., Kjelgren, R., Beede, R., Williams, L., Moore, M.J., Lane, J., Weinberger, G., Menezes Jr., J., 1985. Water use requirements of pistachio trees and response to water stress. Annual report of the California Pistachio Commission. Crop Year 1984-1985, pp. 85-92.
- Grace, S. C., & Logan, B. A. (2000). Energy dissipation and radical scavenging by the plant phenylpropanoid pathway. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 355(1402), 1499-1510.
- Hohl, M., & Schopfer, P. (1991). Water relations of growing maize coleoptiles: comparison between mannitol and polyethylene glycol 6000 as external osmotica for adjusting turgor pressure. Plant Physiology, 95(3), 716-722.
- Hormaza J.I., Dollo L. y Polito V.S. (1994) Determination of relatedness and geographical movements of *Pistacia vera* (pistacho, anacardiaceae) germplasm by RAPD análisis. Economic Botany 48: 349-358. <http://www.jstor.org/stable/4255662>. Accessed 5 Dec. 2022.
- Hormaza, J. I., & Wünsch, A. (2007). Pistachio. In Fruits and nuts (pp. 243-251). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hsiao, T. C. (1973). Plant responses to drought. Annu Rev Plant Physiol, 24, 519-570.
- Hsiao, T. C., & Acevedo, E. (1975). Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology, 1, 59-84.
- Iacono, F. R. A. N. C. E. S. C. O., Buccella, A., & Peterlunger, E. (1998). Water stress and rootstock influence on leaf gas exchange of grafted and ungrafted grapevines. Scientia Horticulturae, 75(1-2), 27-39.
- Iniesta, F., Testi, L., Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2008. Quantifying reductions in consumptive water use under regulated deficit irrigation in pistachio (*Pistacia vera* L.). Agric. Water Manage. 95 (7), 877–886.
- Jones, H. G. (2012). How do rootstocks control shoot water relations?. New Phytologist, 194(2), 301-303.
- Kanber, R., Yazar, A., Önder, S., Köksal, H. 1993. Irrigation response of pistachio (*Pistacia vera* L.). Irrig. Sci. 14, 7–14.
- Kermani, M.M. and Salehi, F. (2006). Determination of pistachio crop evapotranspiration (ETC). Acta Hort. 726, 441-448
- Khoyerdi, F. F., Shamshiri, M. H., & Estaji, A. (2016). Changes in some physiological and osmotic parameters of several pistachio genotypes under drought stress. Scientia horticulturae, 198, 44-51.
- Kirkham, M. B. (2008). Horizontal root growth: Water uptake and stomatal resistance under microgravity. Vadose Zone Journal, 7(3), 1125-1131.
- Köppen, Wladimir (1936). "C". In Köppen, Wladimir; Geiger (publisher), Rudolf (eds.). Das geographische System der Klimate [The geographic system of climates] (PDF).
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). Water relations of plants and soils. Academic press.
- Kumar, P., Roupael, Y., Cardarelli, M., & Colla, G. (2017). Vegetable grafting as a tool to improve drought resistance and water use efficiency. Frontiers in plant science, 8, 1130.

- Lin, T. S., Crane, J. C., Ryugo, K., Polito, V. S., & DeJong, T. M. (1984). Comparative study of leaf morphology, photosynthesis, and leaf conductance in selected *Pistacia* species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109(3), 325-330.
- Lionello, P.; Scarascia, L. The Relation between Climate Change in the Mediterranean Region and Global Warming. *Reg. Environ. Chang.* 2018, 18, 1481–1493.
- Lotfi N, Soleimani A, Vahdati K, Çakmakçı R. (2019) Comprehensive biochemical insights into the seed germination of walnut under drought stress. *Scientia Horticulturae* 250, 329-43
- Lu, Z., & Neumann, P. M. (1998). Water-stressed maize, barley and rice seedlings show species diversity in mechanisms of leaf growth inhibition. *Journal of experimental botany*, 49(329), 1945-1952.
- Mahmoodi M.B., Shalizi M.N, Groninger J.W., Akamani K & Khurram S. (2023) Stand Characteristics and Perceptions of Local Communities on the Management of Pistachio (*Pistacia vera* L.) Forests in an Unstable Region of Afghanistan, *Journal of Sustainable Forestry*, 42:2, 170-188, DOI: 10.1080/10549811.2021.1978097
- Marino, G., La Mantia, M., Caruso, T., & Marra, F. P. (2018). Seasonal dynamics of photosynthesis and total carbon gain in bearing and nonbearing pistachio (*Pistacia vera* L.) shoots. *Photosynthetica*, 56, 932-941.
- Memmi, H. (2016d). Improvement of regulated deficit irrigation in pistachio (*Pistacia vera* L.): water relations and rootstocks influence (Doctoral dissertation, Agronomos).
- Memmi, H., Couceiro, J.F., Gijón, M.C., Pérez-López, D., 2016c. Impact of wáter stress, environment and rootstock on the diurnal behavior of stem wáter potential and leaf conductance in pistachio (*Pistacia vera* L.). *Span. J. Agric. Res.*, <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016142-8207>.
- Memmi, H., Gijón, M.C., Couceiro, J.F., Pérez-López, D. 2016b. Water stressthresholds for regulated deficit irrigation in pistachio trees: rootstock influence and effects on yield quality. *Agric. Water Manag.* 164, 58–72.
- Memmi, H; Centeno, A; Moriana, A; Corell, M; Torrecillas, A; Pérez, D. 2016a Influence of rootstocks on pistachio (*Pistacia vera* L.) water relations. XIII Simposio Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas. Pamplona 18-20 Octubre 2016.
- Mlika, M. (1980). Contribution à l'étude du pistachier en Tunisie: Choix de variétés mâles et femelles à floraison synchrone-Anatomie des fleurs. Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation INAT, Tunisie Search in.
- Moriana, A., Memmi, H., Centeno, A., Martín-Palomo, M. J., Corell, M., Torrecillas, A., & Pérez-López, D. (2018). Influence of rootstock on pistachio (*Pistacia vera* L. cv Kerman) wáter relations. *Agricultural water management*, 202, 263-270.
- Motisi, A., Pernice, F., Sottile, F., & Caruso, T. (2002, June). Rootstock effect on stem water potential gradients in cv.'Armking'nectarine trees. In I International Symposium on Rootstocks for Deciduous Fruit Tree Species 658 (pp. 75-79).
- Nevo, A., Werker, E., & Ben Sasson, R. (1974). The problem of indehiscence of pistachio (*Pistacia vera* L.) fruit. *Israel journal of botany*.

- Nezami, S. R., Yadollahi, A., Hokmabadi, H., & Tajabadipour, A. (2021). Changes in Drought Tolerance Mechanism at Different Times of Stress and Re-hydration in Hybrid Pistachio Rootstock. *Journal of Nuts*, 12(4), 333-360.
- Nonami, H. (1998). Plant water relations and control of cell elongation at low water potentials. *Journal of Plant Research*, 111(3), 373-382.
- Novello, V., & De Palma, L. (1994, September). Observations on the pistachio photosynthetic activity in Southern Italy. In I International Symposium on Pistachio 419 (pp. 97-102).
- Osmolovskaya, N., Shumilina, J., Kim, A., Didio, A., Grishina, T., Bilova, T., ... & Wessjohann, L. A. (2018). Methodology of drought stress research: Experimental setup and physiological characterization. *International journal of molecular sciences*, 19(12), 4089.
- Osmond, C. B., Björkman, O., Anderson, D. J., Osmond, C. B., Björkman, O., & Anderson, D. J. (1980). Water movement and plant response to water stress. *Physiological Processes in Plant Ecology: Toward a Synthesis with Atriplex*, 251-290.
- Ouni, S., Noguera-Artiaga, L., Carbonell-Barrachina, A., Ouerghui, I., Jendoubi, F., Rhouma, A., & Chelli-Chaabouni, A. (2022). Cultivar and Rootstock Effects on Growth, Yield and Nut Quality of Pistachio under Semi-Arid Conditions of South Mediterranean. *Horticulturae*, 8(7), 606.
- Parida, A. K., Das, A. B., Sanada, Y., & Mohanty, P. (2004). Effects of salinity on biochemical components of the mangrove, *Aegiceras corniculatum*. *Aquatic botany*, 80(2), 77-87.
- Polito, V. S., & Pinney, K. (1999). Endocarp dehiscence in pistachio (*Pistacia vera* L.). *International journal of plant sciences*, 160(5), 827-835.
- Preston, A.P., Belcher, D.E., Ley, B.C. 1981. Apple rootstock studies: Bramley's seedling on dwarfing clones. *Experimental Horticulture*, 32, 18-24.
- Rahneshan, Z., Nasibi, F., Lakehal, A., & Bellini, C. (2018). Unravelling salt stress responses in two pistachio (*Pistacia vera* L.) genotypes. *Acta physiologiae plantarum*, 40, 1-13.
- Ranjbarfordoei, A., Samson, R., Van Damme, P., & Lemeur, R. (2000). Effects of drought stress induced by polyethylene glycol on pigment content and photosynthetic gas exchange of *Pistacia khinjuk* and *P. mutica*. *Photosynthetica*, 38(3), 443-447.
- Ruiz-Sanchez, M. D. C., Domingo, R., & Castel, J. R. (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. A review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8, S5-S20.
- Salcedo, L. (2022). Estudio de la fenología en las etapas de floración y desarrollo del fruto del pistacho y sus implicaciones en la gestión y manejo del cultivo. Trabajo de Investigación de Fin de Máster de Ingeniería Agronómica. Universidad Católica de Ávila, 97 pp.
- Salehi M.H. & Hosseinifard J. (2012) Soil and Groundwater Relationships with Pistachio Yield in the Rafsanjan Area, Iran, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43:4, 660-671, DOI: 10.1080/00103624.2012.644006
- Sánchez-Rodríguez, E., Moreno, D. A., Ferreres, F., del Mar Rubio-Wilhelmi, M., & Ruiz, J. M. (2011). Differential responses of five cherry tomato varieties to water stress: changes on phenolic metabolites and related enzymes. *Phytochemistry*, 72(8), 723-729.

Savé, R.; De Herraldea, F.; Aranda, X.; Pla, E.; Pascual, D.; Funes, I.; Biel, C. Potential changes in irrigation requirements and phenology of maize, apple trees and alfalfa under global change conditions in Fluvia watershed, during XXIst century: Results from a modeling approximation to watershed-level water balance. *Agric. Water Manag.* 2012, 114, 78–87

Schulz, M., Seraglio, S. K. T., Della Betta, F., Nehring, P., Valesse, A. C., Daguer, H., ... & Fett, R. (2019). Blackberry (*Rubus ulmifolius* Schott): Chemical composition, phenolic compounds and antioxidant capacity in two edible stages. *Food research international*, 122, 627-634.

Schulze, E. D. (1986). Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology*, 37(1), 247-274.

Sedaghati, N., & Hokmabadi, H. (2015). Optimizing pistachio irrigation management using the relationship between echo-physiological characteristics and water stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(1), 189-200.

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

Shuraki, Y.D., Sedgley, M. (1996). Fruit development of *Pistacia vera* (*Anacardiaceae*) in relation to embryo abortion and abnormalities at maturity. Department of Horticulture, Viticulture and Oenology, Waite Agricultural Research Institute, The University of Adelaide, Glen Osmond, SA 5064, Australia.

Silva, M. D. A., Jifon, J. L., Da Silva, J. A., & Sharma, V. (2007). Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19, 193-201.

Singh, N., Yunus, M., Srivastava, K., Singh, S.N., Pandey, V., Misra, J., Ahmad, K.J. 1995. Monitoring of auto exhaust pollution by road side plants. *Environmental Monitoring Assessment*, 34, 13-25.

Spann, T.M., Beede, R.H., De Jong, T.M. (2007). Preformation in vegetative buds of pistachio (*Pistacia vera*): relationship to shoot morphology, crown structure and rootstock vigor. *Tree Physiology*, 27, 1189-1196.

Spiegel-Roy, P., Mazigh, D., & Evenari, M. (1977). Response of Pistachio to Low Soil Moisture Conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 102(4), 470-473

Testi, L., Goldhamer, D. A., Iniesta, F., & Salinas, M. (2008). Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrigation science*, 26, 395-405.

Torrecillas, A., Alarcón, J. J., Domingo, R., Planes, J., & Sánchez-Blanco, M. J. (1996). Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars. *Plant Science*, 118(2), 135-143.

Torrecillas, A., Corell, M., Galindo, A., Pérez-López, D., Memmi, H., Rodríguez, P., ... & Moriana, A. (2018). Agronomical effects of deficit irrigation in apricot, peach, and plum trees. In *Water scarcity and sustainable agriculture in semiarid environment* (pp. 87-109). Academic Press.

- Tuberosa, R. (2012). Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. *Frontiers in physiology*, 3, 347.
- USDA (2023a) Tree Nuts: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service/USDA. 4 October 2023. Global Market Analysis.
- USDA (2023b) Tree Nuts Annual Report, Turkiye. Foreign Agricultural Service/USDA. 26 September 2023. Global Market Analysis
- USDA (2023c) Tree Nuts Annual Report, European Union. Foreign Agricultural Service/USDA. 25 September 2023. Global Market Analysis
- Walker, R.R., Torokfalvy, E., Behboudian, M.H. 1988. Photosynthetic rates and solute partitioning in relation to growth of salt-treated pistachio plants (*Pistacia vera* cv. Kerman). *Australian Journal of Plant Physiology*, 15, 787-798.
- Whitehouse, W.E. 1957. The pistachio nut: a new crop for the Western United State. *Economic Botany*, 11, 281-321.
- Yatsuhashi, H., Hashimoto, T., & Shimizu, S. (1982). Ultraviolet action spectrum for anthocyanin formation in broom sorghum first internodes. *Plant Physiology*, 70(3), 735-741.
- Zachariadis, T. *Climate Change in Cyprus, Review of the Impacts and Outline of an Adaptation Strategy*; Springer Briefs in Environmental Science; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016.
- Zohary, M. (1952). A monographical study of the genus *Pistacia*. *Palestine Journal of Botany (Jerusalem Series)*, 5(4), 187-228.
- Epstein, L., Beede, R., Kaur, S., & Ferguson, L. (2004). Rootstock effects on pistachio trees grown in *Verticillium dahliae*-infested soil. *Phytopathology*, 94(4), 388-395.



## **Anexos**