

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Influencia del diseño agronómico de riego localizado en la respuesta del níspero japonés [*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.].

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

ALUMNA: MARIA TASA I CANDELA

TUTOR: JUAN MANZANO JUÁREZ

COTUTORES: MARÍA AMPARO MARTÍNEZ GIMENO

JUAN GABRIEL PÉREZ PÉREZ

Curso Académico 2019/2020

València, 27 de enero de 2020

Título: Influencia del diseño agronómico de riego localizado en la respuesta del níspero japonés [*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.].

Resumen: La agricultura de regadío del arco mediterráneo se enfrenta a importantes limitaciones que obligan a aumentar la eficiencia en la aplicación del agua. La adaptación del diseño de la instalación de riego localizado a los requerimientos agronómicos de los cultivos es fundamental para este propósito. En este contexto, se plantea definir la instalación de riego por goteo más adecuada para el cultivo de níspero japonés en base a tres esquemas de distribución espacial y caudal de gotero que generan distinta superficie mojada y mediante el manejo del riego eficiente. Todo ello, se estudia bajo la hipótesis de que el aumento de la superficie mojada mejora el estado hídrico y la eficiencia productiva en el uso del agua en el cultivo de níspero japonés en clima mediterráneo.

Los objetivos principales de este trabajo fueron dos: 1) conocer la respuesta productiva y estado hídrico del cultivo en función del diseño de la instalación de riego, con variación del caudal y del número de goteros empleados por planta, y 2) valorar el efecto del diseño de la instalación de riego sobre el contenido de agua del suelo (estructura espacial y temporal del bulbo húmedo). Para ello, se evaluó el efecto de la aplicación de riego por goteo con 6 (riego convencional, T6), 12 (T12) y 24 (T24) emisores por árbol sobre el estado hídrico y la producción de árboles de níspero cv. 'Algerie' cultivados en las condiciones de Callosa d'en Sarrià (Alicante). Para determinar el estado hídrico se midió el potencial hídrico de tallo y al alba, y se calculó la integral de estrés hídrico. Se caracterizó la dinámica del agua en el suelo mediante sondas capacitivas multisensor, a 0,1, 0,3, 0,5 y 0,7m de profundidad, y horizontalmente mediante cinco sondas puntuales situadas a 0,25, 0,5 y 1 m de distancia del gotero, a las mismas profundidades. La superficie mojada se determinó indirectamente a través de la electroconductividad aparente del suelo, mediante un dispositivo EM38. Además, se evaluó la eficacia de su utilización en las condiciones específicas del experimento. En el momento de la recolección, se determinó el efecto de los tratamientos sobre la cuantía de la cosecha, la calidad externa del fruto, y la distribución de calibres comerciales. Además, se determinó la eficiencia en el uso del agua.

El presente estudio demuestra que se pueden conseguir ahorros significativos de agua modificando las prácticas de riego convencionales, además de mejorar el estado hídrico del cultivo. Los diseños de riego basados en un mayor número de emisores por planta permitieron, mediante el solapamiento de bulbos húmedos y la reducción de la percolación profunda, aumentar la disponibilidad hídrica, que mejoró el estado hídrico del árbol en los momentos de máximo requerimiento. Todo ello, además, se consiguió con volúmenes de agua inferiores al del diseño convencional, logrando un manejo de riego más eficiente, sin afectar negativamente el rendimiento del cultivo, y mejorando, por tanto, la eficiencia de aplicación.

Palabras clave: Riego eficiente, eficiencia en el uso de agua, relaciones hídricas, rendimiento, sondas capacitivas, EM38.

Alumno: Maria Tasa i Candela.

Tutor: Juan Manzano Juárez.

Cotutores: Maria Amparo Martínez Gimeno y Juan Gabriel Pérez Pérez.

València, 27 de enero 2020.

Títol: Influència del disseny agronòmic de reg localitzat en la resposta del nispro japonès [*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.].

Resum: L'agricultura de regadiu de l'arc mediterrani s'enfronta a importants limitacions que obliguen a augmentar l'eficiència en l'aplicació de l'aigua. L'adaptació del disseny de la instal·lació de reg localitzat als requeriments agronòmics dels cultius és fonamental per a aquest propòsit. En aquest context, es planteja definir la instal·lació de reg per degoteig més adequada per al cultiu de nispro japonès en base a tres esquemes de distribució espacial i cabal dels emissors que generen diferent superfície mullada i per mitjà del maneig del reg eficient. Tot això, s'estudia sota la hipòtesi que l'augment de la superfície mullada millora l'estat hídric i l'eficiència productiva en l'ús de l'aigua en el cultiu de nespra japonesa en clima mediterrani.

Els objectius principals d'aquest treball van ser dos: 1) conèixer la resposta productiva i estat hídric del cultiu en funció de el disseny de la instal·lació de reg, amb variació del cabal i del nombre de emissors empleats per planta, i 2) valorar l'efecte de l' disseny de la instal·lació de reg sobre el contingut d'aigua de terra (estructura espacial i temporal del bulb humit). Per a això, es va avaluar l'efecte de l'aplicació de reg per degoteig amb 6 (reg convencional, T6), 12 (T12) i 24 (T24) emissors per arbre sobre l'estat hídric i la producció d'arbres de nespra cv. 'Algerie' cultivats a les condicions de Callosa d'en Sarrià (Alacant). Per determinar l'estat hídric es va mesurar el potencial hídric de tija a migdia solar i a l'alba, i es va calcular la integral d'estrès hídric. es va caracteritzar la dinàmica de l'aigua al sòl mitjançant sondes capacitives multisensor, a 0,1, 0,3, 0,5 i 0,7m de profunditat, i horitzontalment per mitjà de cinc sondes puntuals situades a 0,25, 0,5 y 1 m de distància del emissor, a les mateixes profunditats. La superfície mullada es va determinar indirectament a través de la electroconductivitat aparent de terra, mitjançant un dispositiu EM38. A més, es va avaluar l'eficàcia de la seva utilització en les condicions específiques de l'experiment. En el moment de la recol·lecció, es va determinar l'efecte dels tractaments sobre la quantia de la collita, la qualitat externa del fruit, i la distribució de calibres comercials. A més, es va determinar l'eficiència en l'ús de l'aigua.

El present estudi demostra que es poden aconseguir estalvis significatius d'aigua modificant les pràctiques de reg convencionals, a més de millorar l'estat hídric del cultiu. Els dissenys de reg basats en un major nombre d'emissors per planta van permetre, mitjançant el solapament de bulbs humits i la reducció de la percolació profunda, augmentar la disponibilitat hídrica, que va millorar l'estat hídric de l'arbre en els moments de màxim requeriment. Tot això, a més, es va aconseguir amb volums d'aigua inferiors a el del disseny convencional, aconseguint un maneig de reg més eficient, sense afectar negativament el rendiment del cultiu, i millorant, per tant, l'eficiència d'aplicació.

Paraules clau: Reg eficient, eficiència en l'ús d'aigua, relacions hídriques, rendiment, sondes capacitives, EM38.

Abstract: Influence of drip irrigation agronomic design in Japanese loquat response [*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.].

Resume: Irrigated agriculture in the Mediterranean area faces important limitations that require increasing efficiency in water application. The adaptation of the design of the localized irrigation facility to the agronomic requirements of the crops is essential for this purpose. In this context, it is proposed to define the most suitable drip irrigation installation for the cultivation of Japanese loquat based on three spatial distribution schemes and dripper flow rates that generate different wet surfaces and through efficient irrigation management. All of this is studied under the hypothesis that the increase in of the wet surface improves the water state and the productive efficiency in the use of water in the cultivation of Japanese loquat in the Mediterranean climate.

The main objectives of this work were two: 1) to know the productive response and hydric state of the crop according to the design of the irrigation installation, with variation of the flow and the number of drippers used per plant, and 2) to assess the effect of the design of the irrigation installation on the soil water content (spatial and temporal structure of the wet bulb). To this end, the effect of the application of drip irrigation was evaluated with 6 (conventional irrigation, T6), 12 (T12) and 24 (T24) emitters per tree on the water state and the production of loquat trees cv. 'Algerie' cultivated under the conditions of Callosa d'en Sarrià (Alicante). In order to determine the water state, the midday and predawn stem water potential was measured, and the water stress integral was calculated. The soil water dynamics were characterized by multisensor capacitive probes, at 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7m deep, and horizontally by five probes. It is located 0.25, 0.5 y 1 m away from the drip, at the same depths. The wetted surface was determined indirectly through apparent soil electrical conductivity by means of an EM38 device. In addition, the effectiveness of its use in the specific conditions of the experiment was evaluated. At the time of harvesting, the effect of the treatments on the amount of the harvest, the external quality of the fruit and the distribution of commercial sizes were determined. Furthermore, the water use efficiency was determined.

The present study demonstrates that significant water savings can be achieved by modifying the conventional irrigation practices, in addition to improving the water status of the crop. Irrigation designs based on a greater number of emitters per plant allowed, by overlapping wet bulbs and reducing deep percolation, to increase water availability, which improved the water status of the tree at times of maximum requirement. Moreover, all of this was achieved with lower water volumes than the conventional design, achieving more efficient irrigation management, without negatively affecting crop yield, and thus improving the application efficiency.

Keywords: Efficient irrigation, water use efficiency, water relation, yield, capacitive probes, EM38.

AGRADECIMIENTOS

La consecución del presente Trabajo de Fin de Máster ha sido posible gracias a la ayuda, de un número amplio de personas, por lo que agradezco a todo el equipo humano que ha trabajado en la realización del mismo:

Agradezco a mis cotutores Juan Gabriel Pérez Pérez y María Amparo Martínez Gimeno por sus conocimientos, correcciones, dedicación y ayuda. También a Eduardo Badal Marín y Luis Bonet Pérez de León.

A mi tutor Juan Manzano Juárez.

A Esteve Soler López y a la Cooperativa Agrícola de Callosa d'en Sarrià.

Gracias a todos.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. El cultivo del níspero japonés.....	1
1.1.1 Fases fenológicas del cultivo	1
1.2 Uso de los recursos hídricos	2
1.3 Eficiencia en el uso del agua.....	3
1.4. Influencia de la superficie mojada en el estado hídrico de la planta.....	3
2. Hipótesis y objetivos.....	6
3. Material y métodos	7
3.1 Parcela experimental y material vegetal	7
3.2 Tratamientos de riego y diseño experimental	8
3.3 Determinaciones	10
3.3.1 EXPERIMENTO 1: Efecto del diseño agronómico de la instalación de riego sobre el estado hídrico y rendimiento productivo del níspero japonés.....	10
3.3.1.1 Estado hídrico del cultivo	10
3.3.1.2 Recolección y rendimiento	11
3.3.1.3 Calidad	11
3.3.2 EXPERIMENTO 2: Evaluación del sistema de riego: caracterización de la dinámica del agua en el suelo y de la superficie mojada.	12
3.3.2.1 Monitorización del frente húmedo mediante sondas capacitivas.....	12
3.3.2.2 Monitorización del frente húmedo mediante sondas de inducción electromagnética	14
3.3.2.3 Estado hídrico del cultivo	16
3.3.2.4 Parámetros de intercambio gaseoso.....	17
3.4 Análisis estadístico	17
4. Resultados.....	18
4.1 EXPERIMENTO 1: Efecto del diseño agronómico de la instalación de riego sobre el estado hídrico y rendimiento productivo	18
4.1.1 Datos meteorológicos y dosis de riego	18
4.1.2 Evolución del estado hídrico	20
4.1.3 Recolección y rendimiento	21
4.1.4 Calidad	22
4.2 EXPERIMENTO 2: Evaluación del sistema de riego: caracterización de la dinámica del agua en el suelo y de la superficie mojada.	24
4.2.1 Datos meteorológicos y dosis de riego	24
4.2.2 Monitorización del frente húmedo mediante sondas capacitivas.....	24
4.2.3. Monitorización del frente húmedo mediante sondas de inducción electromagnética EC _a	31
4.2.4 Estado hídrico y parámetros de intercambio de gases.....	34
5. Discusión.....	35

6. Conclusión.....	39
7. Bibliografía.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de cultivo del níspero japonés en Callosa d'en Sarrià. (A) Paisaje típico, terrazas escalonadas bajo malla. (B) Vista interior de plantación de níspero japonés bajo malla y abanalamiento.	7
Figura 2: Esquema del diseño experimental y distribución de los tratamientos de riego.	8
Figura 3: Distribución de los emisores en cada tratamiento de riego. (A) T6, 6 emisores por árbol con un caudal nominal de $4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, (B) T12, 12 emisores por árbol con un caudal nominal de $4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ y (C) T24, 24 emisores por árbol con un caudal nominal de $1,6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$	9
Figura 4: Esquema de la distribución de las sondas de humedad en los tratamientos, T6, T12 y T24.....	13
Figura 5: Esquema de las medidas de EC_a , distribución de los emisores de riego y retícula utilizada para los tratamientos de riego T6 (A), T12 (B) y T24 (C). El punto 0,0 indica la posición del tronco del árbol. Medidas en metros.	15
Figura 6: Evolución temporal de la evapotranspiración (ET_0 , mm), la precipitación (mm), la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) y la dosis de riego (mm) aplicada en los tratamientos T6, T12 y T24..	18
Figura 7: Evolución potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) en los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Las barras verticales indican el error estándar. Dentro de cada fecha, * denota diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. Las líneas de puntos verticales indican la fase fenológica del cultivo.....	20
Figura 8 : Cantidad de frutos recolectados ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$) en los tratamientos de riego T6, T12 y T24 en cada pase de recolección. Las barras verticales indican el error estándar para cada fecha de recolección. No aparecen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).....	22
Figura 9: Clasificación de la fruta recolectada ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$) en cada fecha de recolección en función de los calibres comerciales en los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Las barras verticales indican el error estándar. No aparecen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).	23
Figura 10: Evolución temporal de la evapotranspiración (ET_0 , mm), la precipitación (mm), la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) y la dosis de riego (mm) aplicada en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican periodo de déficit hídrico ($50\% ET_c$).	24
Figura 11: Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ/θ_{cc}) en las sondas de humedad valores promedio \pm el error estándar, instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24 y dosis de riego semanal (mm). Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico.	25

- Figura 12:** Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 0 cm de distancia. Valores promedio de las sondas S_{0-30} y S_{0-50} , instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico. 26
- Figura 13:** Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 25 cm de distancia. Valores promedio de las sondas S_{25-30} y S_{25-50} , instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico. 27
- Figura 14:** Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 50cm. Valores promedio de las sondas S_{50-30} y S_{50-50} , instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico. 28
- Figura 15:** Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 75 cm. Valores de la sonda S_{75-30} , instaladas en los tratamientos T6 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico. 28
- Figura 16:** Representación de la variación espacial y temporal del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje en tanto por uno de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) del 21 de junio, 31 de julio y 25 de septiembre, para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Un triángulo azul indica localización de un emisor..... 30
- Figura 17:** Variación espacial y temporal de las medidas de electroconductividad aparente del suelo ($EC_a, mS \cdot m^{-1}$) en las tres fechas de medidas 21 de junio (previo déficit), 31 de julio (déficit) y 25 de septiembre (post-déficit). P-valor $< 0,05$ indica diferencias estadísticamente significativas para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Las líneas discontinuas separaran las tres franjas de 0-1, 1-2 y 2-3 m. El origen (0,0) indica la situación del árbol. Plano horizontal. 33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Evapotranspiración de referencia (ET_o , mm), k_c teórica, precipitación (P, mm), precipitación efectiva (P_e , mm), evapotranspiración del cultivo (ET_c , mm), dosis de riego aplicada (mm), porcentaje de dosis aplicada respecto a la ET_c , k_c aplicada, porcentaje de k_c aplicada respecto a la k_c teórica, porcentaje de riego aplicado respecto al tratamiento control (T6), potencial hídrico de tallo promedio (Ψ_{tallo} , MPa) \pm error estándar, registradas durante el periodo de estudio y durante las diferentes fases fenológicas del cultivo y tratamientos (Trat.). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos.	19
Tabla 2: Integral de estrés hídrico acumulada, S_{Ψ} (MPa·día) para cada tratamiento de riego T6, T12 y T24 en cada fase fenológica. Valores expresados como la media \pm el error estándar. Dentro de cada fase, letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p-valor < 0,05).	21
Tabla 3: Rendimiento ($kg \cdot \text{árbol}^{-1}$), ingreso bruto ($\text{€} \cdot \text{árbol}^{-1}$), Eficiencia Productiva en el Uso del Agua (EPUA, $kg \cdot m^{-3}$) y Eficiencia Económica en el Uso del Agua ($\text{€} \cdot m^{-3}$) para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Valores expresados como la media \pm el error estándar. P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas.....	22
Tabla 4: Calidad del fruto: peso promedio del fruto (g) , incidencia de las fisiopatías mancha púrpura ($kg \text{ árbol}^{-1}$) y rajado del fruto ($kg \text{ árbol}^{-1}$) para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Valores expresados como la media \pm el error estándar. P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas.....	23
Tabla 5: Medidas de electroconductividad aparente del suelo (EC_a , $mS \cdot m^{-1}$) en tres franjas de un metro de ancho y medida global, para los tratamientos (Trat.) de riego T6, T12 y T24 en las tres fechas de medida de la EC_a : 21 de junio (previo al periodo de déficit hídrico, 100% ET_c), 31 de julio (final del periodo de déficit hídrico, 100% ET_c) y 25 de septiembre (periodo de recuperación, 100% ET_c). P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p < 0,05) entre los tratamientos.....	32
Tabla 6: Comparación de EC_a entre los tres días de medida: 21 de junio (previo al periodo de déficit hídrico, 100% ET_c), 31 de julio (final del periodo de déficit hídrico, 100% ET_c) y 25 de septiembre (periodo de recuperación, 100% ET_c). P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p < 0,05) entre los tratamientos.....	32
Tabla 7: Variables fisiológicas: Potencial hídrico al alba (Ψ_{alba}), potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}), fotosíntesis neta (A_{CO_2} , $\mu mol CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), transpiración (E, $mmol H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) y la conductancia estomática al vapor de agua (g_s , $mol H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) para los tratamientos (Trat.) de riego T6, T12 y T24 en las tres fechas de medida de la EC_a : 21 de junio (previo al periodo de déficit hídrico, 100% ET_c), 31 de julio (final del periodo de déficit hídrico, 100% ET_c) y 25 de septiembre	

(periodo de recuperación, 100%ET_c). P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas 34

1. Introducción

1.1. El cultivo del níspero japonés

El níspero japonés [*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl] es un árbol frutal subtropical perennifolio perteneciente a la familia *Rosaceae*, subfamilia *Maloideae* (Lin *et al.*, 1999), originario del Sur de China, donde se conoce desde hace 2000 años (Calabrese, 2006). Desde China pasó a Japón, donde su cultivo se documenta desde 1180 (Morton y Cowling, 1987). El níspero se introdujo en Europa en el s. XVIII, y a España llegó por el Mediterráneo, a Sagunto (Valencia), expandiéndose posteriormente por el este y sur de la península (Rodríguez, 1983).

En la actualidad, el níspero se cultiva en áreas situadas entre los paralelos 25° y 38° Norte y Sur, siendo Asia y el sur de Europa las principales zonas productoras (Calabrese 2006). El principal país productor es China, con alrededor de 400.000 t (Lin, 2007). Las principales zonas productivas en España son la Comunitat Valenciana, con una superficie de 1.045 ha y una producción de 15.798 t, y Andalucía con una superficie de 1.000 ha y 12.864 t en 2018. La provincia de Alicante lidera la producción nacional con 14.727 t (MAPA, 2019). En Alicante la producción se concentra en la comarca de La Marina Baixa entre los valles de los ríos Algar y Guadalest (Soler *et al.*, 2007), donde municipios como Callosa d'en Sarrià han desarrollado en los últimos 40 años, un cultivo intensivo de níspero japonés en terrazas y bajo malla. A pesar de ser un cultivo minoritario, se consiguen altas producciones y rentabilidades debido a su alto grado de tecnificación (Llácer, 2008). Desde el 14 de enero de 1992, los nísperos producidos en Callosa d'en Sarrià son distinguidos con la Denominación de Origen 'Nísperos de Callosa d'en Sarrià'.

La variedad 'Algerie' es la más importante con cerca del 70% de la superficie destinada a este cultivo (Agustí, 2010). En concreto, en la provincia de Alicante la variedad cultivada por excelencia es 'Algerie' (95%), cuya recolección se extiende desde mediados de abril hasta mediados de mayo, produciéndose el mayor volumen de recolección a finales de abril y principios de mayo (Martínez-Calvo *et al.*, 2000).

1.1.1 Fases fenológicas del cultivo

El ciclo del níspero japonés comprende una etapa vegetativa, desde el final de la cosecha en primavera hasta el verano, y una etapa reproductiva que tiene lugar entre otoño y la siguiente primavera. A lo largo de todo el ciclo se produce la senescencia de hojas del ciclo anterior, sin que exista un periodo claro de caída. (Rodríguez, 1983). En zonas de clima templado, como es la zona mediterránea, presenta tres brotaciones. La brotación principal es la de primavera, seguida de la de invierno y la de otoño que es de menor importancia (Agustí y Reig, 2006).

El desarrollo radical coincide con el crecimiento vegetativo, particularmente durante las brotaciones de otoño y verano. Pero en primavera el crecimiento de la raíz se reduce progresivamente como consecuencia del rápido crecimiento de los frutos, reiniciándose tras la recolección (Reig y Agustí, 2006). La inducción floral se produce a finales de primavera, y durante el verano el meristemo detiene su crecimiento, proceso conocido como parada estival, que reinicia a finales de verano con la diferenciación floral. La floración se produce en otoño, desde mediados de septiembre en los cultivares más precoces hasta finales de diciembre en los más tardíos. Este periodo comprende entre tres y cinco semanas (Martínez-Calvo *et al.*, 2000). El crecimiento del fruto tiene lugar durante el invierno y la maduración se produce a principios de primavera. El crecimiento y el desarrollo del fruto sigue una curva sigmoideal simple característica de los frutales de pepita (Cuevas *et al.*, 2003).

1.2 Uso de los recursos hídricos

El níspero es un cultivo asociado al regadío que requiere la aportación de agua para compensar las escasas e irregulares precipitaciones características del arco mediterráneo (Polat, 2007). Como muchos otros cultivo, su rendimiento está íntimamente ligado a la gestión del riego realizada (Espadafor, 2015).

Estas premisas entran conflicto con la cada vez más patente incertidumbre en cuanto se refiere al suministro futuro de agua para la agricultura. Si las previsiones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2019) se cumplen, se estima que entre 2030 y 2052, se producirá un aumento de la temperatura media global de 1,5 °C. Este aumento ha llevado a prever, un probable aumento en la frecuencia y duración de las sequías en las regiones mediterráneas (Stocker *et al.* 2013), mayor temperatura y radiación y una menor humedad relativa (Espadafor *et al.*, 2011). Estos cambios, podrían ocasionar un aumento en la demanda hídrica de los cultivos y de las necesidades netas de riego, lo cual obligará a aumentar la eficiencia en el uso del agua, adaptando el manejo y la planificación de los recursos disponibles de las zonas de riego (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). Esta situación se verá especialmente agravada en zonas de clima Mediterráneo en la que las necesidades hídricas de los cultivos ya suponen aproximadamente el 70% del volumen total de agua consumida (CEDEX, 2012).

Consecuentemente, se precisa mejorar la eficiencia en el uso de agua agrícola como una manera de asegurar los rendimientos en un escenario de falta de agua (Ferrerres, 2014). Ante esta situación, se plantea la utilización de técnicas de riego que permitan reducir el consumo de agua, sin reducir el rendimiento, maximizando tanto los beneficios económicos como medioambientales (Rodríguez-Sinobas, 2016). Los métodos sostenibles que permitan aumentar la eficiencia en el uso del agua, adquieren cada vez más una especial importancia en regiones áridas y semiáridas. Todos estos problemas a los cuales hace frente la agricultura en

la actualidad, encuentran una solución común bajo el enfoque de la mejora de la eficiencia en el agua del riego.

1.3 Eficiencia en el uso del agua

El correcto diseño de un sistema de riego y el manejo eficiente del agua aplicada requiere definir el tipo de estrategia de riego más adecuada para cada circunstancia (suelo-clima-cultivo) con tal de hacer un uso sostenible de los recursos (Espadador *et al.*, 2018). Los sistemas de riego a lo largo de las últimas décadas han ido modificándose para atender la necesidad de obtener una mayor eficiencia en el uso del agua (EUA), es decir, favorecer que el agua de riego pueda ser empleada de forma óptima por la planta. Aunque este indicador se puede analizar a diferentes escalas, en el ámbito correspondiente al diseño y manejo de un sistema de riego por goteo, es fundamental centrar el objetivo en la eficiencia de aplicación en parcela ($E_{\text{aplicación}}$) que busca optimizar el balance entre la evapotranspiración de la planta y el agua recibida en parcela (Hsiao *et al.*, 2007).

Como principal cambio enfocado a la mejora de la $E_{\text{aplicación}}$, destaca el paso de sistemas de riego por superficie a sistemas localizados a presión. En este sentido, el riego localizado por goteo aplica bajos volúmenes de agua con una alta frecuencia. Si están bien diseñados y manejados, permiten aplicar cantidades constantes y uniformes de agua en la zona radical, al tiempo que la percolación profunda y la evaporación se minimiza y mantiene elevados niveles productivos. (Rallo *et al.*, 2011). En cultivos bajo riego localizado, además de aplicar una cantidad suficiente de agua, su correcta distribución tanto en el tiempo como en el espacio es importante para alcanzar los rendimientos máximos. La EUA no solo es el resultado de una dosis de riego adecuada, si no también está afectada por el porcentaje de suelo cubierto por el riego y la forma y geometría de la superficie mojada (Gispert *et al.*, 2012). Uno de los principales objetivos, por tanto, es encontrar el equilibrio entre un volumen de suelo humedecido para abastecer a las raíces correctamente y el área mojada que minimice las pérdidas por evaporación.

1.4. Influencia de la superficie mojada en el estado hídrico de la planta

Conocer la dinámica del agua en el suelo es fundamental para optimizar el manejo del riego y mejorar la EUA. El agua descargada por los goteros sobre la superficie del suelo se infiltra y se redistribuye vertical y horizontalmente, resultando en un volumen mojado denominado *bulbo húmedo*. Las raíces se concentran preferentemente en este bulbo húmedo, donde sus condiciones son óptimas, ya que tanto el agua como los nutrientes están fácilmente disponibles (Pereira, 2010; Levin *et al.*, 1979).

Puesto que la capacidad de las plantas para satisfacer la demanda evapotranspirativa depende en gran medida del volumen de suelo explorado por las raíces y la distribución y densidad del sistema radical (Espadafor, 2015), el diseño y la adecuación de los sistemas de riego es fundamental para el cultivo.

Es importante tener en cuenta que el agua almacenada en el suelo no sólo debe ser suficiente para cubrir la demanda evapotranspirativa del cultivo, sino que debe estar a disposición de la planta. Este último factor dependerá del potencial hídrico del suelo que condiciona el flujo de agua desde el suelo hasta la atmósfera a través de la planta. Una adecuada distribución del agua en el suelo puede repercutir de manera positiva en el comportamiento del cultivo de forma que pueda satisfacer la demanda evapotranspirativa al menor coste, aumentando así la EUA (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

En el riego localizado por goteo, el número de emisores por planta determina el número y dimensiones del bulbo húmedo. Si el sistema de riego no moja la totalidad del sistema radical se incrementará la resistencia a la absorción, por lo que el número de raíces activas será limitado, reduciendo el estado hídrico de los árboles (Pereira *et al.*, 2010). En esas condiciones, si el cultivo se encuentra en un periodo fenológico crítico o con elevadas demandas hídricas puede llegar a incidir negativamente (Espadafor *et al.*, 2018). Cuando la densidad de raíces en contacto con suelo mojado es insuficiente para atender a la demanda de agua de la parte aérea, la resistencia hidráulica del sistema radical aumenta, es decir, el agua encuentra mayor dificultad para fluir desde las raíces hasta las hojas (Kramer, 1988).

Un mayor volumen de suelo mojado provoca que la cantidad de agua disponible para la planta sea mayor, produciendo una respuesta positiva en términos de crecimiento y producción. El desarrollo y crecimiento radical es consecuencia de las características intrínsecas del cultivo (especie, variedad, patrón) del medio y de las técnicas agronómicas adoptadas. El contenido de agua en el suelo y su localización respecto a la zona de exploración radical son fundamentales para conseguir un adecuado crecimiento y densidad radical. Un diseño inadecuado del riego, provoca respuestas negativas al aumentar la resistencia a la absorción, por lo que afectara negativamente al estado hídrico del cultivo (Gardner, 1960). Por el contrario, cuando el diseño es el adecuado, se produce una buena adaptación de las raíces incrementando su densidad dentro de las zonas húmedas. Este comportamiento es especialmente importante en climas áridos o semiáridos en el que las raíces situadas en la zona húmeda, por lo que particularmente en esas condiciones, el aumento de la superficie mojada mediante el aumento del número de emisores por planta, podría mejorar el estado hídrico del cultivo. Espadafor *et al.* (2018) constató que un aumento de la superficie de las raíces mejora el estado hídrico de la planta al aumentar el potencial hídrico de tallo, la conductancia estomática y la transpiración, siendo más evidentes en el momento de máximos requerimientos hídricos. En consecuencia, el crecimiento y la producción se ven favorecidos por una mayor cantidad de superficie mojada

En cuanto al efecto del volumen de suelo humedecido sobre el desarrollo y el rendimiento del cultivo, estudios previos han concluido que un volumen reducido puede disminuir la transpiración (Moreshet *et al.* 1983; Clothier y Green, 1995) y consecuentemente la productividad del cultivo. Asimismo, Pastor *et al.*, (1997) y Gispert *et al.* (2012) encontraron un aumento de la producción en olivo si se aumentaban el número de emisores. El efecto positivo que tiene sobre el estado hídrico del árbol y la producción el aumento del volumen de suelo húmedo mediante el aumento del número de emisores ha sido recientemente demostrado en especies de origen mediterráneo, como el olivo (Pastor *et al.*, 1997; Gispert *et al.*, 2012), y en especies de origen subtropical húmedo, como los cítricos (Martínez-Gimeno *et al.* 2018). En los cítricos cultivados en clima mediterráneo, el efecto producido por una mayor proporción de suelo mojado como consecuencia de un aumento del número de emisores por planta, presenta un efecto positivo en el estado hídrico de los árboles principalmente cuando la demanda evapotranspirativa atmosférica es elevada. Además, el aumento de la superficie mojada mejora la EUA (Martínez-Gimeno *et al.*, 2018).

Si el volumen de suelo humedecido influye en el estado hídrico y la respuesta productiva del árbol, pero ésta a su vez depende de la especie (variedad y patrón) y del medio, las implicaciones que el buen diseño y manejo del riego por goteo, así como de otros sistemas de riego localizado, tienen sobre el cultivo son muy relevantes. En la actualidad, es habitual el cultivo de especies frutales de origen subtropical y hasta tropical, en el clima Mediterráneo. La exigencia que este tipo de clima impone sobre estas especies, mejor adaptadas a zonas húmedas, junto con las previsiones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, obliga a aumentar la EUA del mejor modo para cada especie. En el caso del níspero japonés, se ha estudiado la aplicación de riego deficitario controlado (Ballester *et al.*, 2018), pero se desconoce el efecto que tiene el aumento de la superficie mojada sobre el estado hídrico del cultivo, la gestión del riego y la productividad.

Este Trabajo Fin de Máster es fruto del convenio de colaboración establecido entre el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) y la Cooperativa Agrícola de Callosa d'en Sarrià para el desarrollo del proyecto "Mejora de la eficacia de riego en producciones estratégicas de la Cooperativa Agrícola de Callosa d'en Sarrià".

2. Hipótesis y objetivos

En el presente estudio se pretende definir la opción de diseño de riego por goteo más adecuada para el cultivo de níspero japonés en base a tres esquemas de distribución espacial y caudales de goteros que generan distinta superficie mojada mediante un manejo de riego eficiente. Para ello se plantea la siguiente hipótesis “el aumento de la superficie mojada mejora el estado hídrico y la eficiencia productiva en el uso del agua en el níspero japonés”

Los objetivos establecidos son los siguientes:

1. Conocer la respuesta productiva y estado hídrico del cultivo en función de distintos diseños de la instalación de riego basados en la variación de caudal y número de goteros empleados por planta.
2. Valorar el efecto de los distintos diseños agronómicos de la instalación de riego sobre el contenido de agua del suelo (estructura espacial y temporal del frente húmedo).

3. Material y métodos

3.1 Parcela experimental y material vegetal

El experimento se llevó a cabo desde el 21 de mayo de 2018 hasta el 25 de septiembre de 2020 en una parcela ubicada en el Campo de Experimental de la Cooperativa Agrícola de Callosa d'en Sarrià, en la provincia de Alicante ($38^{\circ} 38' 58''$ N, $0^{\circ} 6'$ W y 247 m.s.n.m).

El suelo de la parcela experimental es pedregoso y presenta una textura arcillosa (45% arcilla, 25% limo, 30% arena). Su contenido en materia orgánica es del 2,8%, siendo un valor medio y su profundidad efectiva es de 0,80 m. El agua de riego empleada tiene una conductividad eléctrica de $0,46 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ por lo que es adecuada para el cultivo del níspero japonés (Quiñones y Legaz, 2006). El clima es mediterráneo con una precipitación media anual de 450 mm, una evapotranspiración de referencia (ET_0) anual media de 990 mm y una temperatura media anual de 18°C . Los meses más fríos son enero y febrero, con temperaturas medias de 9°C , y los más calurosos julio y agosto, con temperaturas medias de 25°C .

El estudio se ha realizado en árboles adultos de níspero japonés de la variedad 'Algerie' cultivados en terrazas escalonadas con muros de contención de piedra y bajo malla cortavientos de cubierta de polietileno monofilamento de 1 mm de espesor y 6×6 hilos· cm^{-2} (Figura 1). Los árboles se plantaron en 2011 sobre patrón franco, con un marco de plantación de $5,5 \times 5,0$ m. La fertilización, la poda, el aclareo, así como el manejo de plagas y enfermedades, se llevaron a cabo de acuerdo con las recomendaciones técnicas de la Cooperativa.

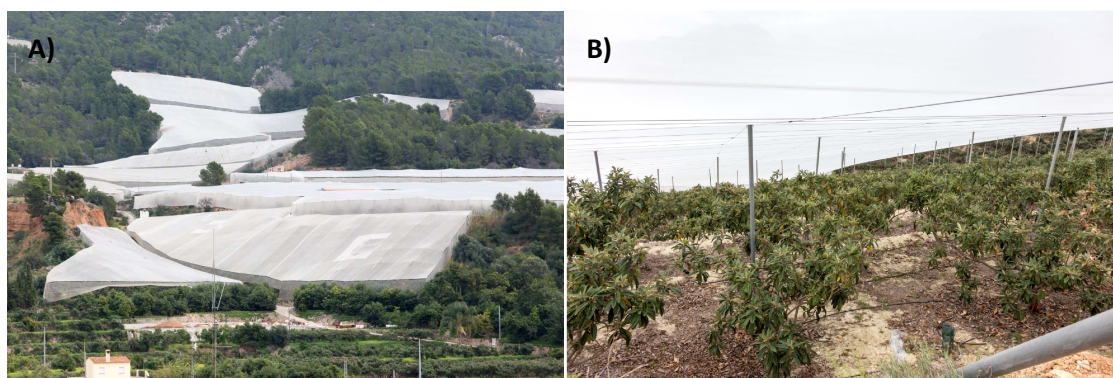


Figura 1: Sistema de cultivo del níspero japonés en Callosa d'en Sarrià. (A) Paisaje típico, terrazas escalonadas bajo malla. (B) Vista interior de plantación de níspero japonés bajo malla y abanalamiento.

3.2 Tratamientos de riego y diseño experimental

Se establecieron tres tratamientos de riego con tres repeticiones para cada uno (9 subunidades) de acuerdo con un sistema de bloques al azar. Cada subunidad experimental disponía de 5-6 árboles. Las determinaciones se realizaron aproximadamente en los árboles centrales de los tratamientos (Figura 2).

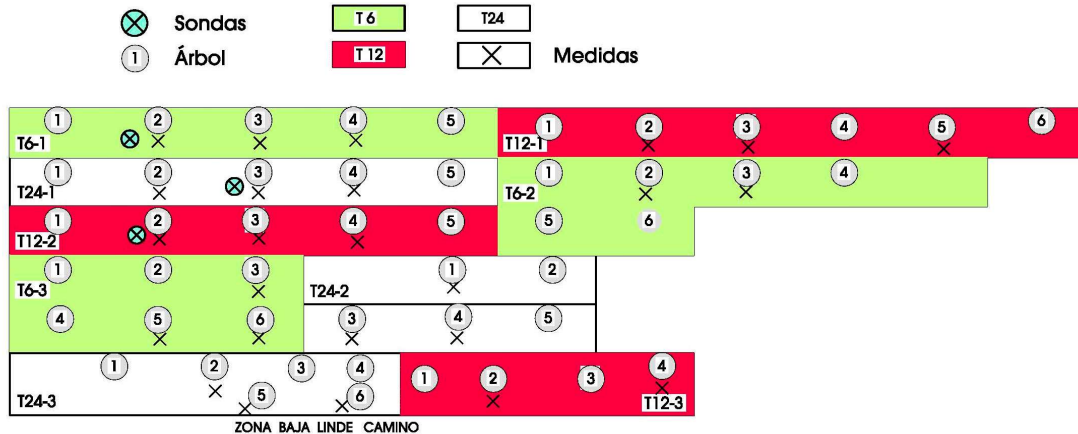


Figura 2: Esquema del diseño experimental y distribución de los tratamientos de riego.

La diferencia entre los distintos tratamientos ensayados radica en el número de goteros por planta y el caudal arrojado por éstos, quedando definidos de la siguiente forma (Figura 3):

- T6:** riego convencional mediante 6 emisores por planta con un caudal nominal de $4,0 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ con una distancia entre emisores de 1 m y dos líneas de goteros.
- T12:** riego mediante 12 emisores por planta con un caudal nominal de $4,0 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, con una distancia entre emisores fue de 0,5 m y dos líneas de goteros.
- T24:** riego mediante 24 emisores por planta con un caudal nominal de $1,6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, con una distancia entre emisores de 0,25 m y dos líneas de goteros.

3. Material y métodos

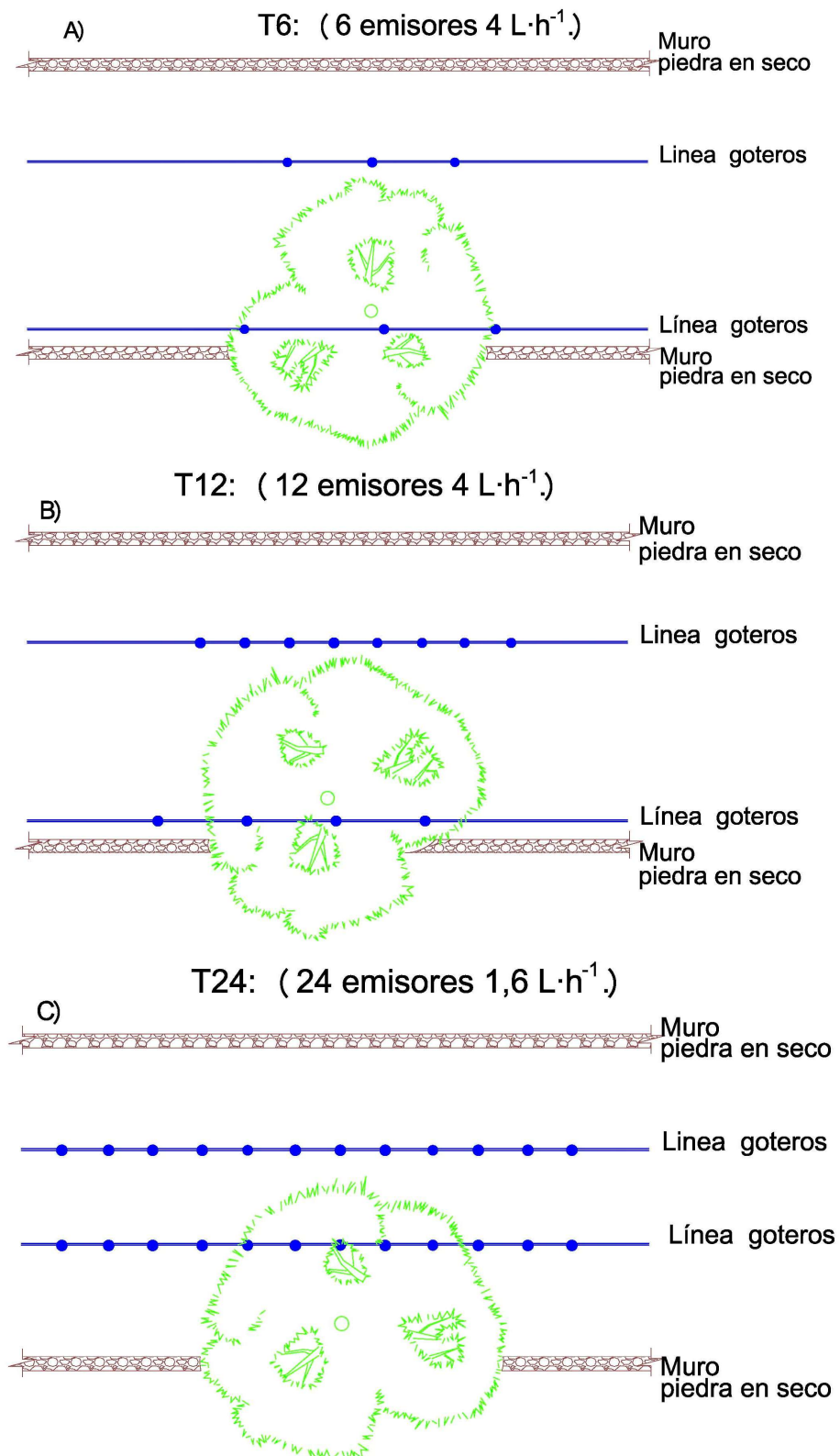


Figura 3: Distribución de los emisores en cada tratamiento de riego. (A) T6, 6 emisores por árbol con un caudal nominal de $4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, (B) T12, 12 emisores por árbol con un caudal nominal de $4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ y (C) T24, 24 emisores por árbol con un caudal nominal de $1,6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$

3. Material y métodos

Los sistemas de riego fueron instalados en 2017. La programación del riego se determinó con una frecuencia semanal, estimando la dosis de riego a través de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), calculada como el producto de la ET_0 , calculada según el método de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), por el coeficiente de cultivo (K_c), obtenido por el Servicio de Tecnología del Riego (STR) del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) de manera experimental. Los valores diarios de temperatura, radiación solar, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento se obtuvieron de la estación agroclimática situada bajo malla en la propia parcela experimental, perteneciente a la red de estaciones meteorológicas del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (Red SIAR) a través de la página web STR-IVIA. (<http://riegos.ivia.es/>). Esta dosis teórica ha sido ajustada teniendo en cuenta la dinámica del contenido de agua del suelo ($\Delta\theta$) obtenida mediante sondas de humedad situadas en la parcela, el estado hídrico de la planta a través del potencial hídrico de tallo medido al mediodía solar (ψ_{tallo}) y el pronóstico del tiempo (temperatura, velocidad del viento y lluvia). En cada tratamiento, el tiempo y la frecuencia de riego se ajustaron para mantener el nivel de humedad adecuado en el área de mayor concentración de raíces, evitando las pérdidas por percolación profunda a partir de los 0,7-1 m de profundidad.

A finales de cada mes de junio, se aplicó de forma generalizada a todos los tratamientos una restricción de riego hasta finales del mes de julio, en la que se redujo el aporte de agua aproximadamente al 50% de la ET_c . Esta técnica cultural es habitual en la zona de cultivo y se emplea para inducir la floración (Ballester *et al.*, 2018).

3.3 Determinaciones

3.3.1 EXPERIMENTO 1: Efecto del diseño agronómico de la instalación de riego sobre el estado hídrico y rendimiento productivo del níspero japonés

Se evaluó el efecto de los tratamientos de riego sobre la respuesta del níspero japonés durante la campaña 2018-2019, desde el 19 de mayo del 2018 hasta el 21 de mayo de 2019 (fin de la recolección).

3.3.1.1 Estado hídrico del cultivo

El estado hídrico de la planta se determinó mensualmente mediante la evaluación del potencial hídrico de tallo a mediodía solar, ψ_{tallo} , utilizando una cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965). Las medidas se realizaron sobre dos hojas maduras por árbol de tres árboles por bloque y tratamiento. Cada hoja fue previamente embolsada con bolsas plástico aluminizado y con cierre hermético al menos una hora antes de la medida (Turner, 1981).

Además, se calculó la integral de estrés hídrico (S_{ψ} , MPa·día) utilizando los valores de ψ_{tallo} obtenidos, de acuerdo con la ecuación descrita por Myers (1988):

$$S_{\psi} = \left| \sum_{i=0}^{i=i} (\bar{\Psi}_{i,i+1} - c)n \right|$$

Donde $\bar{\Psi}_{i,i+1}$ es el promedio de ψ_{tallo} para un intervalo $i,i+1$ (MPa), c es el máximo ψ_{tallo} medido durante el ensayo, que en este caso fue de -0,53MPa y n es el número de días del intervalo.

3.3.1.2 Recolección y rendimiento

Los frutos se recolectaron de acuerdo con los estándares comerciales de color y tamaño propuestos por la Cooperativa Agrícola de Callosa d'en Sarrià. Se realizaron cuatro pases de recolección. El rendimiento de cada árbol se determinó como los kg totales recolectados por árbol ($\text{kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$).

Para evaluar el impacto de los tratamientos de riego sobre la respuesta económica, se evaluó el ingreso bruto ($\text{€} \cdot \text{árbol}^{-1}$) calculado teniendo en cuenta la evolución de precios respecto a las semanas y calibres a los que se liquida al agricultor en la Cooperativa agrícola de Callosa d'en Sarrià durante la temporada 2018-2019.

La Eficiencia Productiva en el Uso del Agua (EPUA, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), se calculó como el ratio entre el rendimiento total anual y el agua de riego aplicada en esa misma campaña (Pereira *et al.*, 2012). La eficiencia Económica en el Uso del Agua (EEUA, $\text{€} \cdot \text{m}^{-3}$), fue calculada como el ratio entre los ingresos brutos y el agua de riego aplicado en esa misma campaña.

3.3.1.3 Calidad

Los frutos recolectados se clasificaron según los calibres comerciales basados en su diámetro (GGG > 53 mm, GG 46-52 mm, G 32-45 mm, M 31-28 mm y P < 28 mm). También se determinó el peso promedio de los frutos (g). Además, durante la recolección, se determinó la cantidad de frutos ($\text{kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$) que presentaron las principales fisiopatías del níspero, mancha púrpura y rajado.

3.3.2 EXPERIMENTO 2: Evaluación del sistema de riego: caracterización de la dinámica del agua en el suelo y de la superficie mojada.

En este segundo experimento, se trató de evaluar la dinámica del agua en el suelo en los tratamientos de riego T6, T12 y T24 con tal de caracterizar las posibles variables que tuvieran incidencia sobre el comportamiento agronómico del cultivo estudiado en el experimento 1. El estudio se llevó a cabo tras la recolección del experimento 1, durante los meses de junio a septiembre de 2019.

3.3.2.1 Monitorización del frente húmedo mediante sondas capacitivas

El contenido de agua del suelo se evaluó mediante sondas capacitivas de reflectometría de dominio de frecuencia (FDR). Estos equipos miden el contenido volumétrico del agua en el suelo a partir de la medición de la constante dieléctrica del suelo. Las mediciones se realizaron tanto en el plano vertical (en profundidad) como en el horizontal (en longitud) siguiendo los esquemas de la Figura 4.

Por un lado, se instaló una sonda multisensor (EnviroScan, Sentek Pty Ltd, Australia) por tratamiento (Figura 4) con cuatro sensores a 0,1, 0,3, 0,5 y 0,7 m de profundidad. Las sondas FDR se ubicaron adyacentes a la línea de riego por goteo y aproximadamente 0,10 m del emisor siguiendo las premisas de Bonet *et al.*, (2010). La codificación empleada para la interpretación de los valores de humedad de estas sondas será en adelante S_{0-10} , S_{0-30} , S_{0-50} y S_{0-70} .

Por el otro, junto a las sondas multisensor, se instalaron cinco sondas puntuales (10Hs, Decagon Devices, Inc., Pullman, Wash.) para valorar el contenido de agua en el plano horizontal. Tres se situaron a una profundidad de 0,3 m y distanciadas entre ellas 0,25 m (sensores S_{30-25} , S_{30-50} y S_{30-75}) y otras dos se situaron a 0,5 m de profundidad y también distanciadas entre ellas 0,25 m (sensores S_{50-25} , S_{50-50})

Las lecturas de las sondas se visualizaron mediante el programa informático "IrriMAX 8". (IrriMAX User Guide, Sentek Pty Ltd.).

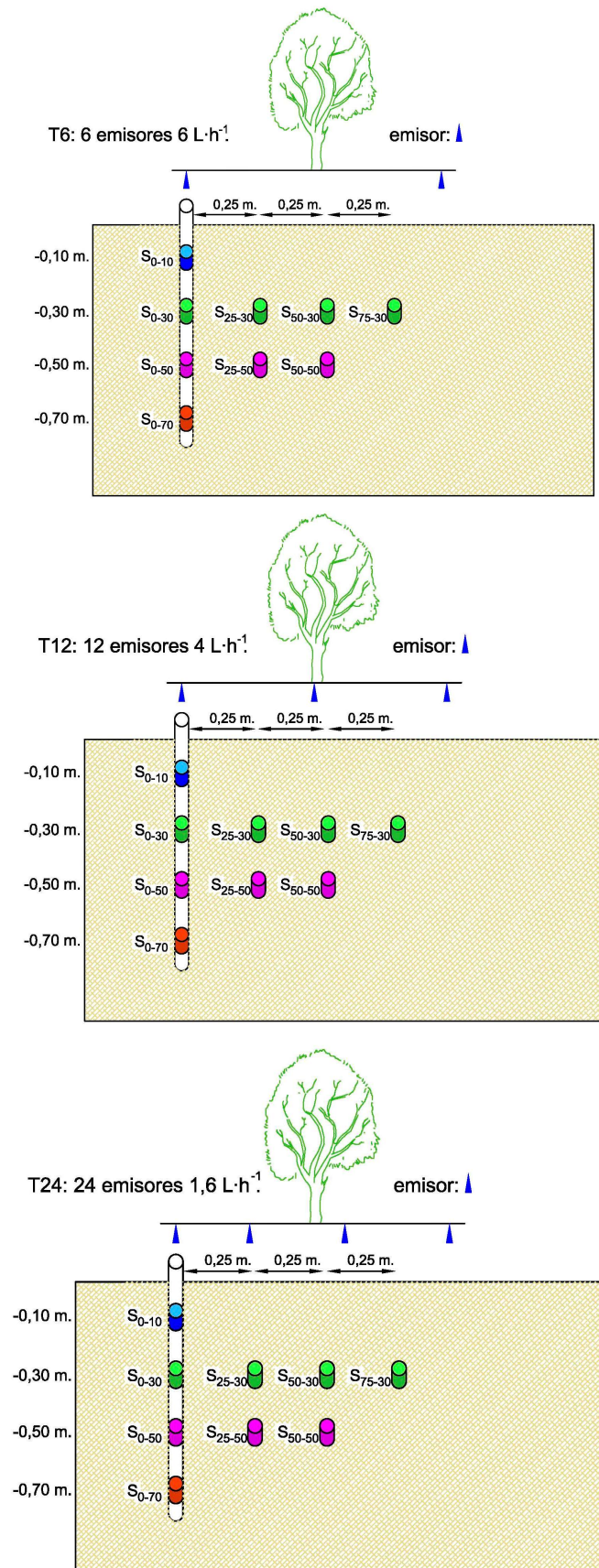


Figura 4: Esquema de la distribución de las sondas de humedad en los tratamientos, T6, T12 y T24.

3.3.2.2 Monitorización del frente húmedo mediante sondas de inducción electromagnética

La superficie mojada del suelo se evaluó indirectamente mediante un equipo que mide la electroconductividad aparente del suelo (EC_a , $mS \cdot m^{-1}$). Estos equipos miden la EC_a de una manera no invasiva, permitiendo la evaluación de áreas extensas en relativamente poco tiempo (Corwin y Lesch, 2005a). El hecho de emplear el instrumento para estimar la dinámica del agua en el suelo, implica asumir una serie de errores que pueden afectar el resultado final, debido a que la EC_a está influenciado, además de por el contenido de agua en el suelo, por una combinación de propiedades fisicoquímicas entre las que se encuentran el contenido de sales solubles, contenido de arcilla y mineralogía, densidad aparente y materia orgánica. Por todo, se han utilizado las mediciones de EC_a para mapear la variación espacial del contenido de agua del suelo, asumiendo las demás propiedades como constantes. Además, por esta razón, se evaluó la efectividad del instrumento para el mapeado y determinación del contenido de humedad del suelo en las condiciones específicas en las que se desarrolló el ensayo. Para esta medida se empleó el equipo de inducción electromagnética EM38 (Geonics Limited, Ontario, Canada). El equipo dispone una bobina transmisora localizada en un extremo del instrumento a un metro de distancia de una bobina receptora en el otro extremo. El instrumento está compuesto por dos unidades de lectura, una en la posición horizontal (EC_a -H) y otra en la posición vertical (EC_a -V). En el ensayo se operó con el modo de medida horizontal puesto que existe una mayor sensibilidad del aparato hasta 0,4 m de profundidad en el dipolo horizontal y de 1,5 m de profundidad en el dipolo vertical (McNeill, 1980). El equipo EM38 se calibró de acuerdo con las instrucciones proporcionadas por el fabricante previamente a la realización de las medidas. Dado que el aparato es muy sensible a las condiciones ambientales, como la temperatura del aire, se repitió la calibración del equipo cada hora. El instrumento también es sensible a la presencia de objetos metálicos, por lo que durante el proceso de calibración y medida se limitó el contacto con objetos metálicos que interferir afectando a la calidad de las medidas de la EC_a en campo (Sudduth *et al.*, 2001).

El registro de la EC_a se realizó abarcando una retícula de 3,0 x 2,5 m con una separación de 0,5 m entre las medidas. En cada punto medio de la matriz, la medición se realizó siguiendo tanto la dirección transversal como la longitudinal, con un total de 42 mediciones por árbol (Figura 5). Se realizaron 4 repeticiones por tratamiento. Las medidas de EC_a del suelo, se determinaron en tres días con diferente aporte hídrico para evaluar los diferentes patrones de movimiento del agua en el suelo. En concreto, las medidas se realizaron antes, durante y después del periodo de déficit hídrico al que se sometieron los árboles de los tratamientos desde el 24 de junio hasta el 4 de agosto. Las determinaciones se realizaron el 21 de junio, en la que la dosis de riego fue del 100% ET_c , el 31 de agosto, durante la fase de restricción hídrica del 50% ET_c , y el 25 de septiembre, en la fase de recuperación en la que la dosis de riego fue del 100% ET_c .

3. Material y métodos

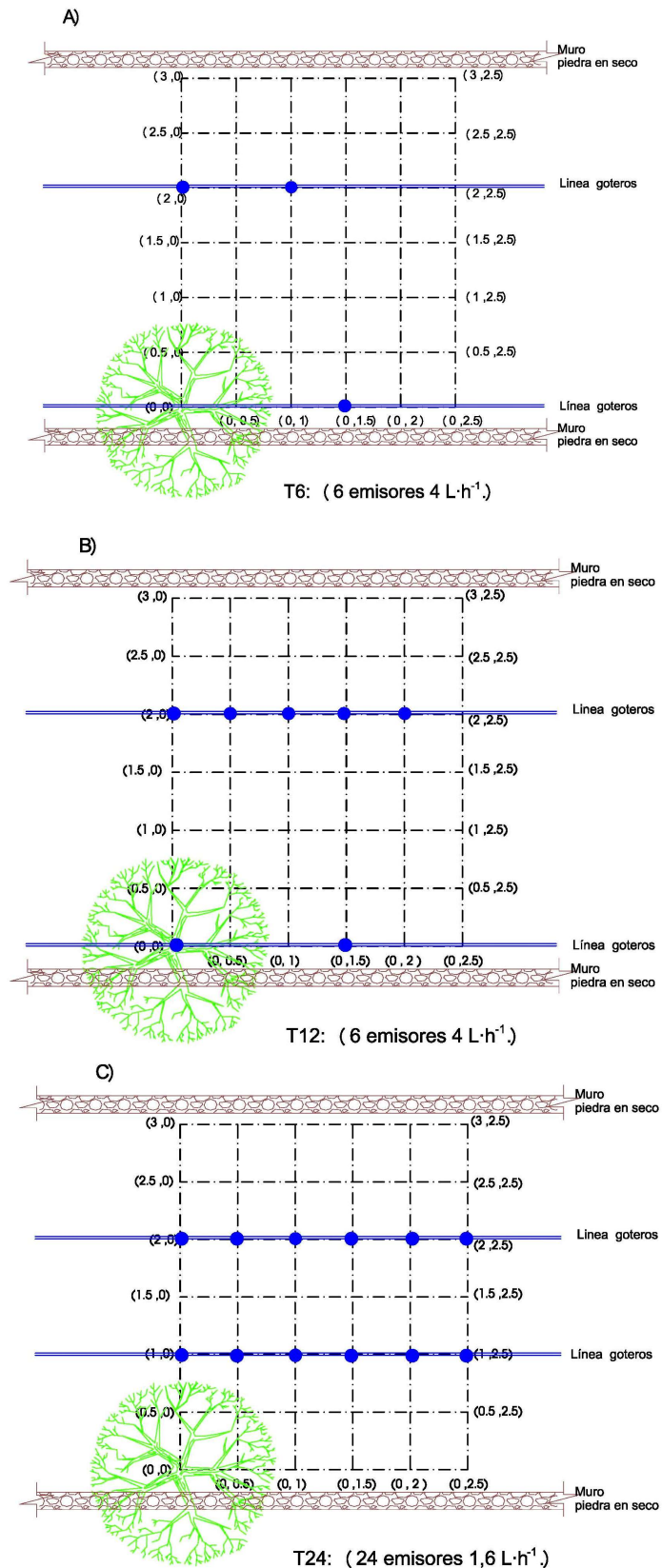


Figura 5: Esquema de las medidas de EC_a, distribución de los emisores de riego y retícula utilizada para los tratamientos de riego T6 (A), T12 (B) y T24 (C). El punto 0,0 indica la posición del tronco del árbol. Medidas en metros.

Procesado de los datos EM38:

En primer lugar, se procedió a realizar una corrección de las lecturas de EC_a con tal de minimizar el efecto distorsionador que pudiera producir la variación de la temperatura a lo largo de la jornada de medidas. Los datos registrados se referenciaron a 25°C utilizando la ecuación propuesta en el Handbook 60 de la (U.S Salinity Laboratory Staff, 1954).

$$EC_{25} = f_t EC_t$$

Donde f_t es el factor de conversión de temperatura:

$$f_t = 0,4470 + 1.4034 e^{-t/26.815}$$

El posterior procesado de los datos y la creación de los mapas se realizó con el programa ArcGis 9 Editor (ESRI, USA) y Surfer 8 (Golden Software, LLC, USA).

Para la representación espacial de los datos de EC_a se realizó una interpolación mediante el método kriging. Éste es un procedimiento geoestadístico que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con valores en la coordenada z. Este método geoestadístico presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos, o a todos los puntos dentro de un radio específico, para determinar el valor de salida para cada ubicación. El método se compone de varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y la exploración de la superficie de varianza. El método kriging pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general parte de una suma ponderada de los datos:

$$Z_{(s_0)} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Donde N es la cantidad de valores medidos, $Z_{(s_i)}$, el valor medido en la ubicación i, λ_i es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i y, por último, s_0 es la ubicación de la predicción

3.3.2.3 Estado hídrico del cultivo

El estado hídrico de la planta se determinó mediante la evaluación del potencial hídrico de tallo a mediodía, ψ_{tallo} , empleando el mismo procedimiento descrito en el experimento 1. Adicionalmente, también se determinó el potencial hídrico al alba (ψ_{alba}). En este caso, las medidas se realizaron previas al amanecer (5:00-6:00 a.m) mediante la cámara de presión sobre dos hojas maduras por árbol de tres árboles por repetición y tratamiento. Ésta es una

3. Material y métodos

medida de potencial relacionada únicamente con el contenido de agua, es decir, con el potencial matricial en el suelo ya que los estomas están cerrados y las hojas no transpiran. Estas determinaciones se realizaron en las tres fechas en las que se realizaron las mediciones mediante el dispositivo EM38.

3.3.2.4 Parámetros de intercambio gaseoso

La tasa de fijación de CO₂ o fotosíntesis neta (A_{CO_2} , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), transpiración (E , $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) y la conductancia estomática al vapor de agua (g_s , $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) se midieron con un equipo portátil de determinación de la fotosíntesis LI-6400 (LI-COR, Nebraska, USA), equipado con una cámara foliar (6 cm^2). Las medidas se tomaron en hojas sanas, maduras y completamente expandidas expuestas al sol. La tasa de flujo de aire molar dentro de la cámara de la hoja fue de $500 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. Todas las mediciones se tomaron a una concentración de CO₂ de referencia similar al ambiente ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) y un flujo fotónico fotosintético saturado de $1.200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, mediante el uso de una fuente de luz roja / azul (6400-02B LED) conectada a la cámara foliar. Los parámetros de intercambio de gases fueron calculados automáticamente por el programa interno del LI-6400, basado en las ecuaciones de Von Caemmerer y Farquhar (1981). Esta medida se realizó en las tres fechas en las que se realizaron las mediciones mediante el dispositivo EM38.

3.4 Análisis estadístico

Los datos obtenidos en el experimento se sometieron a un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) empleando el programa Statgraphics Centurión XVIII (Statpoint Technologies Inc., Warrenton, VA, USA). En aquellas situaciones en que se obtuvieron diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación múltiple de Duncan, con un nivel de significancia al 5% ($p \leq 0.05$).

4. Resultados

4.1 EXPERIMENTO 1: Efecto del diseño agronómico de la instalación de riego sobre el estado hídrico y rendimiento productivo

4.1.1 Datos meteorológicos y dosis de riego

Durante el ciclo de cultivo 2018-19, la ET_0 y la precipitación acumulada fueron de 879 mm y 477 mm, Las precipitaciones tuvieron lugar, principalmente, durante los meses de otoño y primavera, correspondiendo con los periodos de cuajado y maduración del fruto. La precipitación efectiva fue de 101 mm, y la temperatura media osciló entre 6,5 °C, en enero, al final de la fase de cuajado, y 31,7 °C, en agosto, en plena diferenciación floral (Figura 6).

Siguiendo los criterios de programación del riego, definidos en la metodología, el volumen total de agua aplicada fue de 262 mm, 242 mm y 226 mm en T6, T12 y T24, respectivamente (Figura 6 y Tabla 1). En todos los tratamientos del experimento se realizó un manejo eficiente del riego mediante el uso de sensores de suelo y medidas fisiológicas de la planta, consiguiéndose una reducción sustancial en el aporte de agua respecto a las necesidades teóricas calculadas mediante el balance hídrico (Allen *et al.*, 1998). Esta reducción fue del 16%, 23% y 28% en los tratamientos T6, T12 y T24, respectivamente. Comparando el volumen aplicado en los tres diseños agronómicos, y considerando al tratamiento T6 como referencia de un diseño convencional, el tratamiento T24 permitió un ahorro total de agua del 13,6%, mientras que T12 supuso una reducción del 6,3%. Durante la fase de floración y cuajado se produjeron las mayores reducciones respecto del tratamiento de referencia (T6), siendo éstas de 18,2% y 17,6% en los tratamientos T12 y T24, respectivamente (Tabla 1).

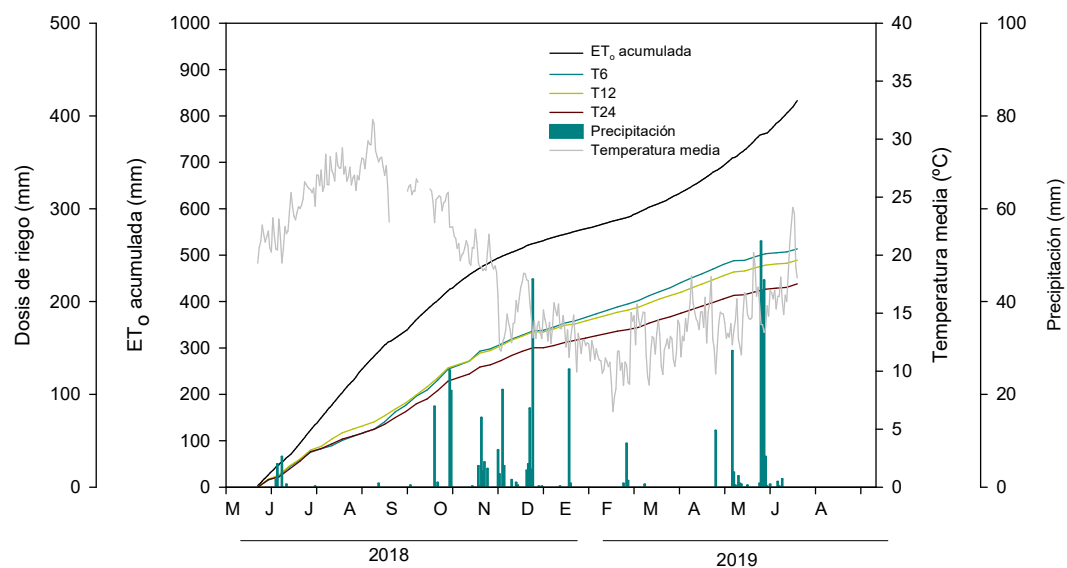


Figura 6: Evolución temporal de la evapotranspiración (ET_0 , mm), la precipitación (mm), la temperatura media (°C) y la dosis de riego (mm) aplicada en los tratamientos T6, T12 y T24.

4. Resultados

Tabla 1: Evapotranspiración de referencia (ET_o , mm), k_c teórica, precipitación (P, mm), precipitación efectiva (P_e , mm), evapotranspiración del cultivo (ET_c , mm.), dosis de riego aplicada (mm), porcentaje de dosis aplicada respecto a la ET_c , k_c aplicada, porcentaje de k_c aplicada respecto a la k_c teórica, porcentaje de riego aplicado respecto al tratamiento control (T6), potencial hídrico de tallo promedio (Ψ_{tallo} , MPa) \pm error estándar, registradas durante el periodo de estudio y durante las diferentes fases fenológicas del cultivo y tratamientos (Trat.). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos.

Fase fenológica	ET_o (mm)	k_c teórica	P (mm)	P_e (mm)	ET_c (mm)	Trat.	Dosis aplicada (mm)	% ET_c	k_c aplicada	% respecto k_c teórica	% dosis respecto T1	Ψ_{tallo} (MPa)
Crecimiento vegetativo	147,2	0,38	14,0	2,6	55,9	T6	41,4	74,0	0,28	73,7	-	-0,89 \pm 0,04
						T12	43,9	78,5	0,30	78,9	+6,0	-0,79 \pm 0,03
						T24	41,5	74,1	0,27	71,0	+0,2	-0,85 \pm 0,03
Parada estival	224,3	0,48	1,2	0	107,7	T6	58,7	59,5	0,28	59,1	-	-1,39 \pm 0,03a
						T12	54,3	54,5	0,25	50,4	-7,4	-1,30 \pm 0,02b
						T24	48,3	45,0	0,23	48,0	-17,6	-1,41 \pm 0,03a
Floración y cuajado	214,8	0,55	240,4	51,3	118,1	T6	92,3	78,1	0,45	82,3	-	-1,02 \pm 0,03
						T12	75,5	63,9	0,38	69,6	-18,2	-0,92 \pm 0,03
						T24	75,8	64,2	0,36	66,2	-17,8	-0,94 \pm 0,03
Crecimiento y maduración	293,1	0,455	221,6	46,7	133,4	T6	71,6	53,5	0,29	63,6	-	-0,81 \pm 0,01
						T12	67,5	50,6	0,27	58,5	-5,7	-0,76 \pm 0,01
						T24	60,8	45,6	0,24	52,2	-15,1	-0,77 \pm 0,02
TOTAL	879,4	0,46	477,2	100,6	414,1	T6	264,0	66,5	0,32	69,5	-	-0,98 \pm 0,02
						T12	241,2	61,8	0,30	65,2	-6,3	-0,91 \pm 0,02
						T24	226,4	57,2	0,27	58,7	-13,6	-0,94 \pm 0,02

4.1.2 Evolución del estado hídrico

El estado hídrico de los árboles fue similar al inicio del experimento (final de la primavera) en los tres tratamientos de riego, con valores de Ψ_{tallo} en torno a -0,8 MPa. La restricción hídrica aplicada desde finales de junio hasta finales de julio, con una reducción de aproximadamente el 50% de la ET_c , produjo una disminución drástica del Ψ_{tallo} en todos los tratamientos. Los árboles alcanzaron el valor mínimo de Ψ_{tallo} de todo el periodo de estudio justo al final del periodo de restricción hídrica. Precisamente, en ese momento, se detectaron las primeras diferencias significativas entre los tratamientos, de modo que los tratamientos T6 y T24 mostraron un Ψ_{tallo} significativamente menor (-1,6 MPa) que T12 (-1,4 MPa). Tras la reposición completa de la dosis de riego a inicios de agosto, el estado hídrico se recuperó, aumentando el Ψ_{tallo} progresivamente en todos los tratamientos. El máximo valor de Ψ_{tallo} se alcanzó en la primavera siguiente (6 de marzo), alcanzando -0,6 MPa en todos los tratamientos. En ese momento, coincidiendo con la fase de mayor tasa de crecimiento del fruto, el Ψ_{tallo} se redujo en los tres tratamientos con diferencias significativas entre ellos. Así, los árboles del tratamiento T6 presentaron un valor de Ψ_{tallo} significativamente inferior (-0,9 MPa) que los árboles de los tratamientos T12 y T24 (-0,8 MPa). Finalmente, en la fase final de maduración del fruto, desde finales de abril a junio, el estado hídrico de los árboles en los tres tratamientos se estabilizó, mostrando valores de Ψ_{tallo} en torno a -0,9 MPa (Figura 7).

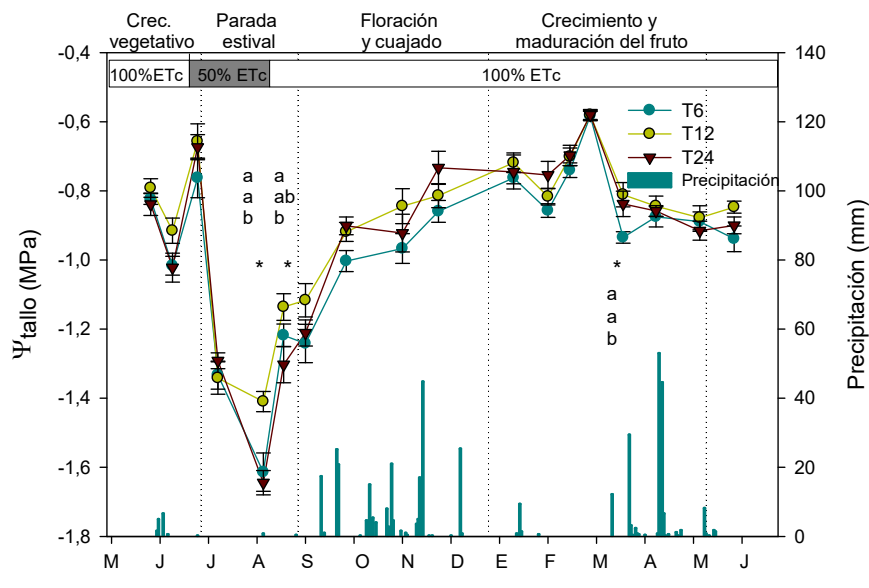


Figura 7: Evolución potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) en los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Las barras verticales indican el error estándar. Dentro de cada fecha, * denota diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. Las líneas de puntos verticales indican la fase fenológica del cultivo.

4. Resultados

La integral de estrés hídrico acumulado a lo largo del ciclo de cultivo mostro valores más elevados aunque no significativos (p -valor=0.06) en el tratamiento T6, respecto a los tratamientos T12 y T24. La integral de estrés hídrico acumulada durante el ciclo fue de 170 MPa·día para el tratamiento T6, 145 MPa·día para T12 y 154 MPa·día para T24 (Tabla 2).

A pesar de no aparecer diferencias significativas en la integral de estrés global, en el estudio por fases, se observa que, durante la parada estival, la integral de estrés del tratamiento T12 fue significativamente menor que la del resto de tratamientos, mientras que en el resto de periodos fenológicos no aparecieron diferencias entre tratamientos, aunque el T6 siempre acumuló un mayor nivel de estrés (Tabla 2).

Tabla 2: Integral de estrés hídrico acumulada, S_{ψ} (MPa·día) para cada tratamiento de riego T6, T12 y T24 en cada fase fenológica. Valores expresados como la media \pm el error estándar. Dentro de cada fase, letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p -valor < 0,05).

Tratamiento	S_{ψ} (MPa·día)				
	Crecimiento vegetativo	Parada estival	Floración y cuajado	Crecimiento y maduración del fruto	Total
T6	12,5 \pm 0,8	47,9 \pm 2,2b	54,8 \pm 2,9	54,7 \pm 2,1	170,0 \pm 6,5
T12	9,9 \pm 0,8	42,6 \pm 1,3 a	45,4 \pm 3,2	47,2 \pm 3,0	145,1 \pm 6,7
T24	12,0 \pm 0,9	47,7 \pm 1,0b	48,7 \pm 3,3	46,0 \pm 4,1	154,3 \pm 8,0
P-valor	0,09	0,04	0,12	0,12	0,06

4.1.3 Recolección y rendimiento

La recolección se inició el 16 de abril en todos los tratamientos y se prolongó durante 4 semanas hasta el 14 de mayo, siendo el 5 de mayo cuando mayor cantidad de frutos se recolectaron en todos los tratamientos. La cantidad de frutos recolectados ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$) en cada fecha de recolección no difirió significativamente entre tratamientos, por lo que las estrategias de riego no tuvieron un efecto sobre la precocidad de la cosecha (Figura 8).

El rendimiento total no se vio modificado significativamente por efecto de los tratamientos. Por otra parte, el ingreso bruto ($\text{€}\cdot\text{árbol}^{-1}$) en el tratamiento T6 fue ligeramente superior a los tratamientos T12 y T24, pero no fue estadísticamente significativo. Finalmente, en la EPUA ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) y la EEUA ($\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$) tampoco se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 3).

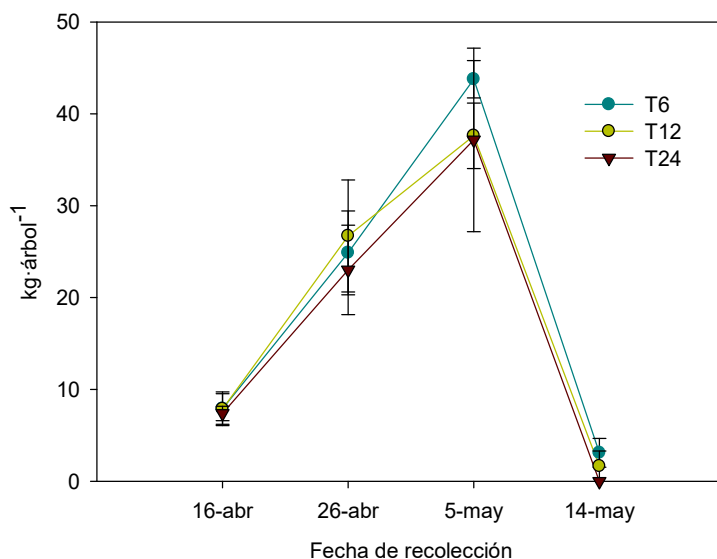


Figura 8 : Cantidad de frutos recolectados ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$) en los tratamientos de riego T6, T12 y T24 en cada pase de recolección. Las barras verticales indican el error estándar para cada fecha de recolección. No aparecen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Tabla 3: Rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$), ingreso bruto ($\text{€}\cdot\text{árbol}^{-1}$), Eficiencia Productiva en el Uso del Agua (EPUA, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) y Eficiencia Económica en el Uso del Agua ($\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$) para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Valores expresados como la media \pm el error estándar. P-valor $< 0,05$ indica diferencias estadísticamente significativas.

Tratamiento	Rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$)	EPUA ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Ingreso bruto ($\text{€}\cdot\text{árbol}^{-1}$)	EEUA ($\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$)
T6	$79,6 \pm 7,0$	$11,1 \pm 1,0$	$66,7 \pm 4,2$	$0,25 \pm 0,02$
T12	$73,8 \pm 6,7$	$9,9 \pm 1,4$	$53,8 \pm 5,2$	$0,22 \pm 0,06$
T24	$67,6 \pm 15,4$	$9,0 \pm 2,5$	$49,4 \pm 11,8$	$0,22 \pm 0,10$
P-valor	0,73	0,86	0.14	0.52

4.1.4 Calidad

La distribución de calibres comerciales no difirió significativamente entre los tres tratamientos de riego. En todos los casos, la población de frutos alcanzó la máxima frecuencia (en torno a 40 kg de fruta árbol^{-1}) en el calibre GG y la mínima frecuencia (3 kg de fruta árbol^{-1}) en el calibre M (Figura 9).

Los tratamientos tampoco modificaron significativamente ni el peso promedio del fruto (g), aunque fue ligeramente superior (3 g mayor, en promedio) en el tratamiento T24, ni en la cantidad de fruta afectada por las principales alteraciones fisiológicas del níspero japonés, es decir, la mancha púrpura y el rajado del fruto (Tabla 4).

4. Resultados

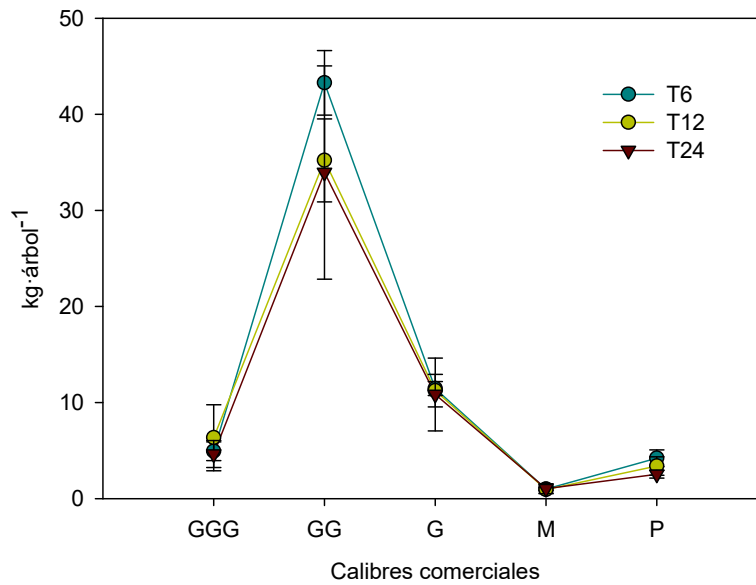


Figura 9: Clasificación de la fruta recolectada ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$) en cada fecha de recolección en función de los calibres comerciales en los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Las barras verticales indican el error estándar. No aparecen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Tabla 4: Calidad del fruto: peso promedio del fruto (g), incidencia de las fisiopatías mancha púrpura ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$) y rajado del fruto ($\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$) para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Valores expresados como la media \pm el error estándar. P-valor $< 0,05$ indica diferencias estadísticamente significativas.

Tratamiento	Peso promedio fruto (g)	Mancha púrpura ($\text{Kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$)	Rajado ($\text{Kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$)
T6	59,6 \pm 1,3	6,7 \pm 1,1	7,8 \pm 1,2
T12	59,2 \pm 1,3	8,8 \pm 1,0	8,2 \pm 0,9
T24	62,1 \pm 1,5	7,2 \pm 0,6	7,3 \pm 0,7
P-valor	0,29	0,34	0,81

4.2 EXPERIMENTO 2: Evaluación del sistema de riego: caracterización de la dinámica del agua en el suelo y de la superficie mojada.

4.2.1 Datos meteorológicos y dosis de riego

Durante la realización del segundo experimento (de julio a septiembre de 2019), la ET_0 y la precipitación acumulada fueron de 388 mm y 184 mm, respectivamente. Las precipitaciones tuvieron lugar, principalmente, a inicios de septiembre cuando se registraron 154 mm. La temperatura media osciló entre 19,2 °C, y 31,2 °C (Figura 10).

El volumen total de agua aplicada durante este periodo fue de 118 mm, 120 mm y 105 mm y la dosis de riego aplicada en el periodo de restricción hídrica fue de 37 mm, 42 mm y 35 mm en los tratamientos T6, T12 y T24 respectivamente. (Figura 10).

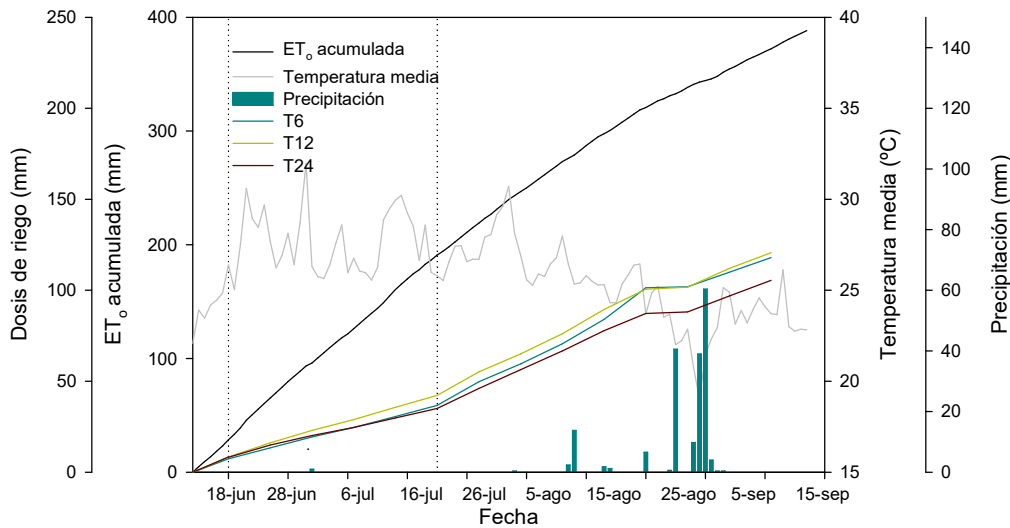


Figura 10: Evolución temporal de la evapotranspiración (ET_0 , mm), la precipitación (mm), la temperatura media (°C) y la dosis de riego (mm) aplicada en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican periodo de déficit hídrico (50% ET_c).

4.2.2 Monitorización del frente húmedo mediante sondas capacitivas.

El contenido de agua del suelo evolucionó de forma diferente a lo largo de la campaña y en función de los tratamientos. La evolución estacional del contenido de agua registrada por las sondas FDR (tanto verticales como horizontales expresado como el porcentaje de la capacidad de campo (θ/θ_{cc}). Los datos integran todos los sensores ubicados a 0,3 m y 0,5 m (S_{0-30} , S_{0-50} , S_{25-30} , S_{25-50} , S_{50-30} , S_{50-50}).

El tratamiento T6 mostró valores de θ/θ_{cc} inferiores que T12 y T24 durante el periodo de estudio (Figura 11). El contenido de humedad en el suelo de todos los tratamientos disminuyó como respuesta al déficit hídrico impuesto. Esta disminución fue más evidente en el tratamiento T6,

4. Resultados

en el que se alcanzó valores del 80% de θ/θ_{cc} , seguida del tratamiento T12, que alcanzó valores del 90%. Sin embargo, es de destacar que el contenido de humedad del tratamiento T24 apenas disminuyó, y mantuvo su nivel de humedad entorno al 95% de θ/θ_{cc} durante todo el periodo. Tras la reposición del riego, el contenido de humedad del suelo aumentó notablemente en todos los tratamientos. No obstante, este incremento fue menor en el tratamiento T6 que en el resto, registrando un 87% de θ/θ_{cc} , mientras que T12 y T24 alcanzaron valores de 97% y 100%, respectivamente (Figura 11).

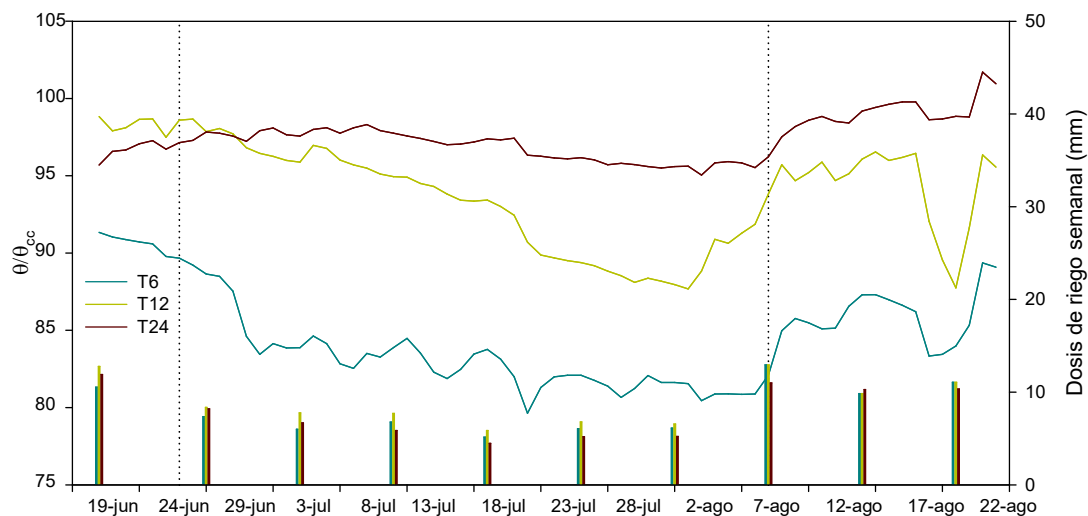


Figura 11: Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ/θ_{cc}) en las sondas de humedad valores promedio \pm el error estándar, instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24 y dosis de riego semanal (mm). Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico.

El análisis de la información proporcionada por las sondas de humedad se completó estudiando el perfil vertical (entre 0.3 y 0.5 m de profundidad) a distintas distancias del emisor (0, 0.25, 0.50 y 0.75 m), con tal de evaluar la anchura del bulbo húmedo en cada tratamiento.

S₀₋₂₅ y S₀₋₅₀

En este sentido, se observa que en la sonda vertical situada en paralelo al emisor (0 m; S₀₋₂₅ y S₀₋₅₀), se detectó, en todos los tratamientos, un incremento del contenido de agua en el suelo como consecuencia de cada pulso de riego (Figura 12). Los valores de θ/θ_{cc} fueron similares para los tratamientos T12 y T24 e inferiores para T6 durante todo el periodo de estudio. La mayor disminución del contenido de humedad del suelo se produjo en el tratamiento T6 durante el periodo de imposición de déficit hídrico (50% ETc), alcanzando un valor de θ/θ_{cc} del 65%. Por su parte, en el tratamiento T12 también se redujo el θ/θ_{cc} aunque no de una manera tan acusada. Cabe destacar que en el tratamiento T12, durante un periodo de 10 días, concretamente del 18 al 28 de julio, el emisor sufrió un ligero desplazamiento respecto del

4. Resultados

punto de origen, por lo que en este periodo no se pudieron detectar los pulsos de riego. Es de destacar que el θ/θ_{cc} se mantuvo prácticamente constante a lo largo de todo el periodo en el tratamiento T24, situándose en torno a valores del 95%, incluso durante el periodo de imposición del déficit hídrico. Finalmente, tras la reposición del 100% de la ET_c , el contenido de humedad del suelo aumentó en los tratamientos T6 y T12 hasta situarse en los valores previos al déficit, de 95% y 100% de θ/θ_{cc} (Figura 12).

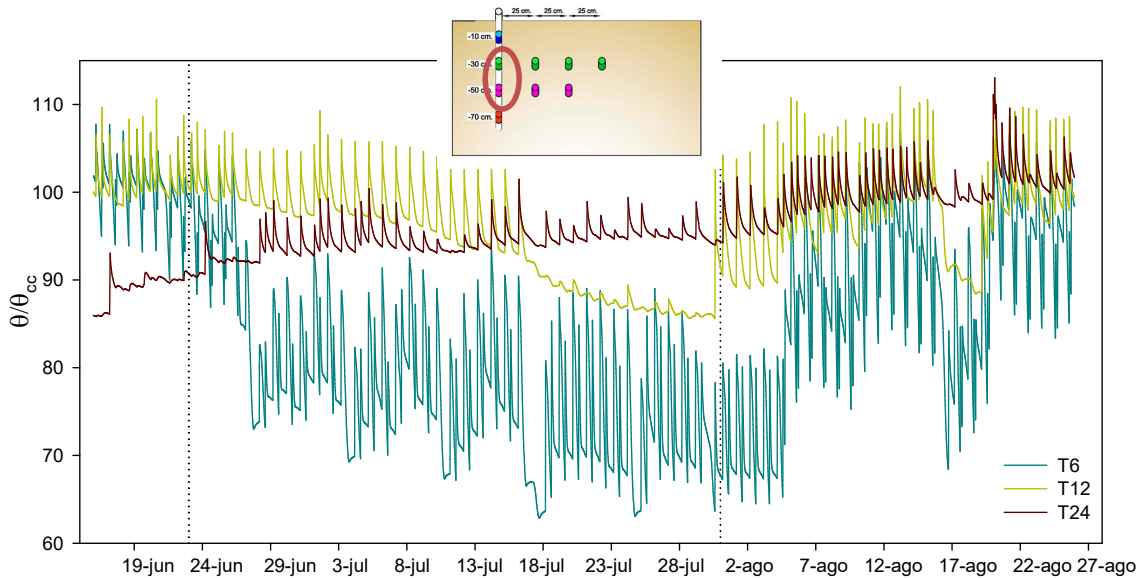


Figura 12: Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 0 cm de distancia. Valores promedio de las sondas S_{0-30} y S_{0-50} instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico.

Respecto al tratamiento T6, no ocurrió lo mismo en las sondas situadas a 0,25 m, 0,50 m y 0,75 m de distancia del emisor las cuales no detectaron, prácticamente, los incrementos en el contenido de humedad del suelo como consecuencia de los riegos. Sin embargo, las sondas sí que registraron un aumento tras cada uno de los riegos de los tratamientos T12 y T24 (Figuras 13, 14 y 15).

S_{25-30} y S_{25-50}

Los valores de las sondas situadas a 0,25 m del emisor (S_{25-30} y S_{25-50}) se situaron en torno al 97% de θ/θ_{cc} para los tratamientos T12 y T24, y, además, no registraron una disminución durante el periodo de restricción de las necesidades al 50% de la ET_c . Por otra parte, en el tratamiento T6 se observó una disminución del nivel de humedad hasta el 80% de θ/θ_{cc} (Figura 13).

S₅₀₋₃₀ y S₅₀₋₅₀

En cuanto a las sondas situadas a 0,50 m del emisor (S₅₀₋₃₀ y S₅₀₋₅₀) el contenido de humedad durante el periodo de déficit hídrico del tratamiento T12 se redujo notablemente, alcanzando un valor de 82%. En el tratamiento T24, éste también se redujo ligeramente al final del periodo del déficit, hasta el 95% de θ/θ_{cc} . Al finalizar este periodo, ambos tratamientos recuperaron su estado de humedad inicial, situándose en 95% y 105% respectivamente. La humedad del suelo del tratamiento T6 se mantuvo en el 87% de θ/θ_{cc} (Figura 14).

S₇₅₋₃₀

La evaluación de humedad en los sensores más alejados al gotero (S₇₅₋₃₀) mostró una reducción del contenido de humedad hasta el 94% de θ/θ_{cc} en el tratamiento T24 al final del periodo del déficit hídrico. Tras la reposición al 100% de la ET_c, éste aumentó hasta situarse en el valor previo a la imposición del déficit, alcanzando el 100% de θ/θ_{cc} . La humedad del suelo del tratamiento T6 se mantuvo en el 87% de θ/θ_{cc} (Figura 15). Debido a un fallo en la sonda S₇₅₋₃₀ del tratamiento T12, no se registraron datos durante el periodo de estudio.

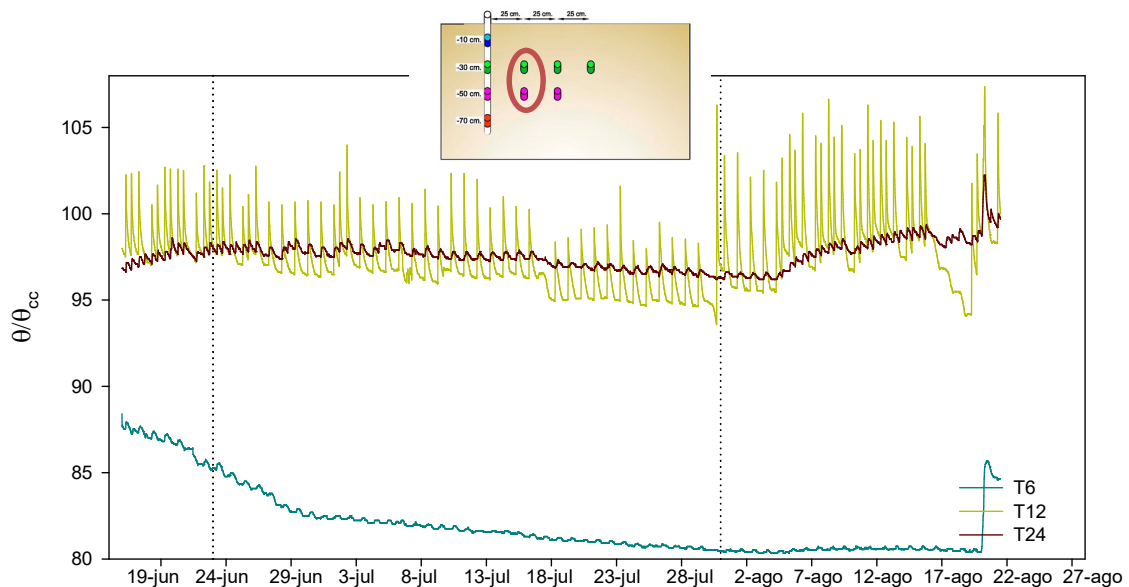


Figura 13: Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 25 cm de distancia. Valores promedio de las sondas S₂₅₋₃₀ y S₂₅₋₅₀, instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico.

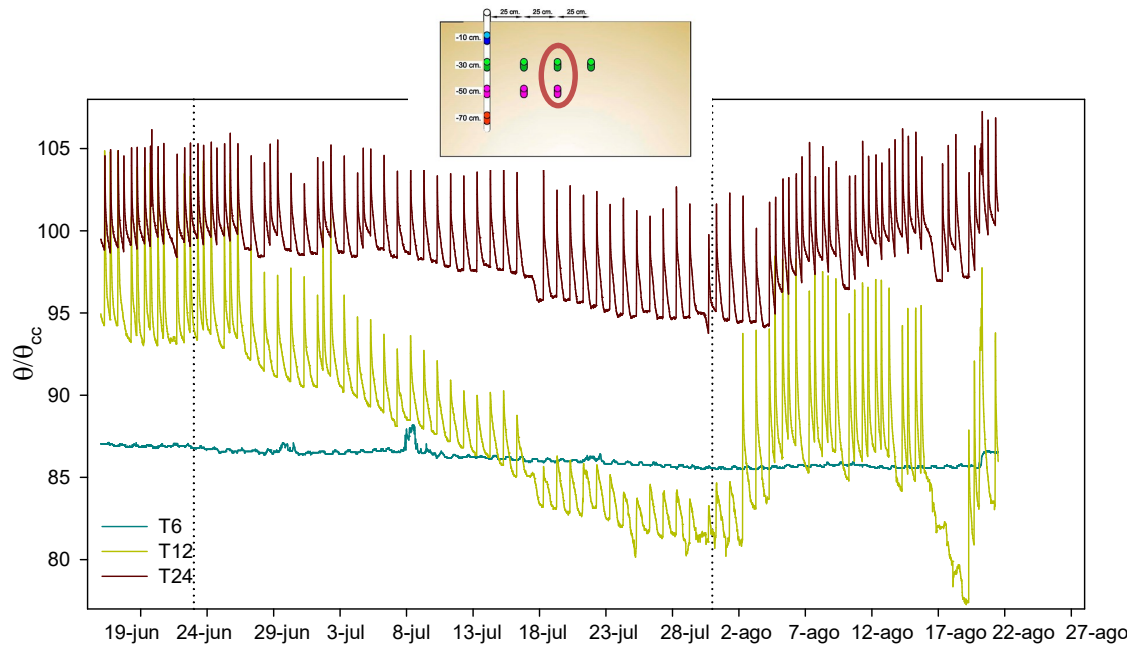


Figura 14: Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 50cm. Valores promedio de las sondas S_{50-30} y S_{50-50} , instaladas en los tratamientos T6, T12 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico.

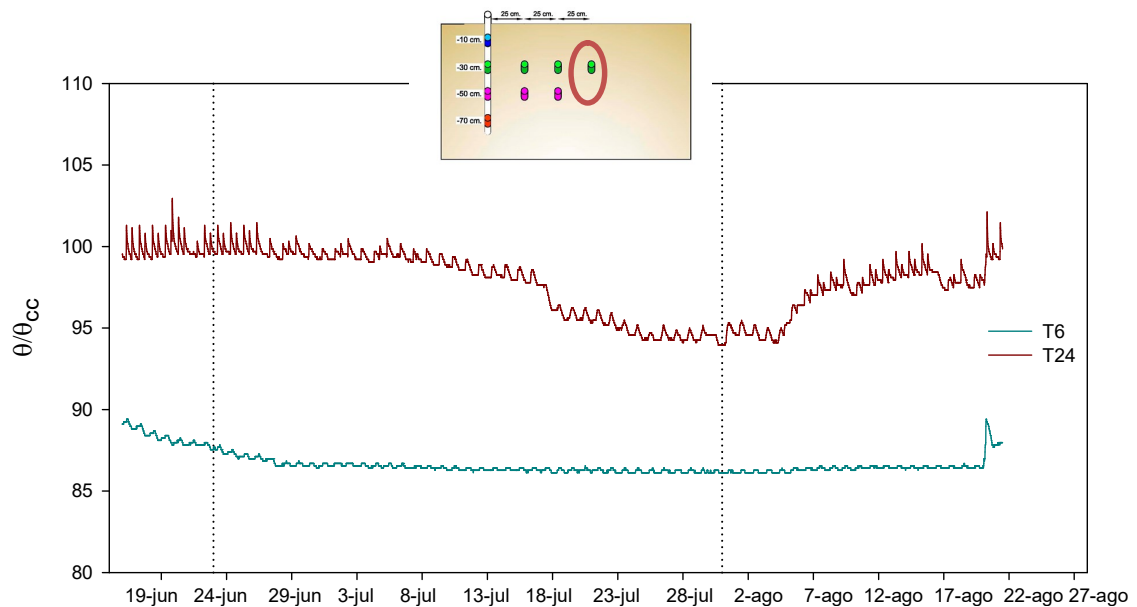


Figura 15: Variación estacional del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) en las sondas colocadas en paralelo al emisor a 75 cm. Valores de la sonda S_{75-30} , instaladas en los tratamientos T6 y T24. Las líneas de puntos verticales indican la fase de déficit hídrico.

La información descrita en las figuras anteriores se integró mediante la interpolación espacial del contenido de humedad para la evaluación de la distribución de θ/θ_{cc} en tres días con diferente aporte hídrico (figura 16). Las tonalidades azul oscuro indican un valor elevado de θ/θ_{cc} (120%), mientras que las tonalidades marrones indican un valor bajo (80%), pasando por valores intermedios representado por tonalidades azul claro. En términos generales, la distribución y caudal de los emisores produjo un bulbo de una anchura inferior en los árboles del tratamiento T6 en comparación al de los tratamientos T12 y T24, como consecuencia de la falta del solapamiento entre ellos. El bulbo del tratamiento T6 se situó bajo el emisor, fue estrecho y profundo, mientras que en los tratamientos T12 y T24, como consecuencia del solapamiento entre bulbos, se formó un bulbo ancho y abarcó todo el perfil del suelo en horizontal. No obstante, en el T24 (emisores de bajo caudal) el bulbo fue más superficial, sin alcanzar los 50 cm de profundidad.

De una forma más detallada, se destaca:

- El día 21 de junio, en el que se aportaba el 100% de la ET_c , el tratamiento T6 mostró un menor contenido de humedad que los tratamientos T12 y T24. El frente húmedo del tratamiento T6 se extendió desde el origen hasta los 0,50 m de profundidad, siendo en el resto del perfil los valores de humedad inferiores del 80% de la capacidad de campo. En el tratamiento T12, todo el perfil presentó valores de humedad elevados, situándose alrededor del 100% de la capacidad de campo. En el T24, se observó que los valores de humedad se mantuvieron superficialmente, próximos al 100% de la capacidad de campo. No obstante, a los 0,45 m de profundidad, la humedad empezó a disminuir, situándose en torno al 95% θ/θ_{cc} (Figura 16).
- El día 31 de julio, durante el periodo de déficit hídrico, contenido de humedad del tratamiento T6 disminuyó en todo el perfil estudiado, hasta valores inferiores al 80% del θ/θ_{cc} , mientras que en los tratamientos T12 y T24 se consiguió mantener el nivel de humedad, a pesar de la menor dosis de riego aplicada, entre el 90 y 100% de la capacidad de campo. (Figura 16).
- El día 25 de septiembre, tras restablecer la dosis de riego al 100% de la ET_c y tras las lluvias registradas (66 mm) los días anteriores, todos los tratamientos presentaron un nivel de humedad próximo al 100% de la capacidad de campo en todo el perfil (Figura 16).

4. Resultados

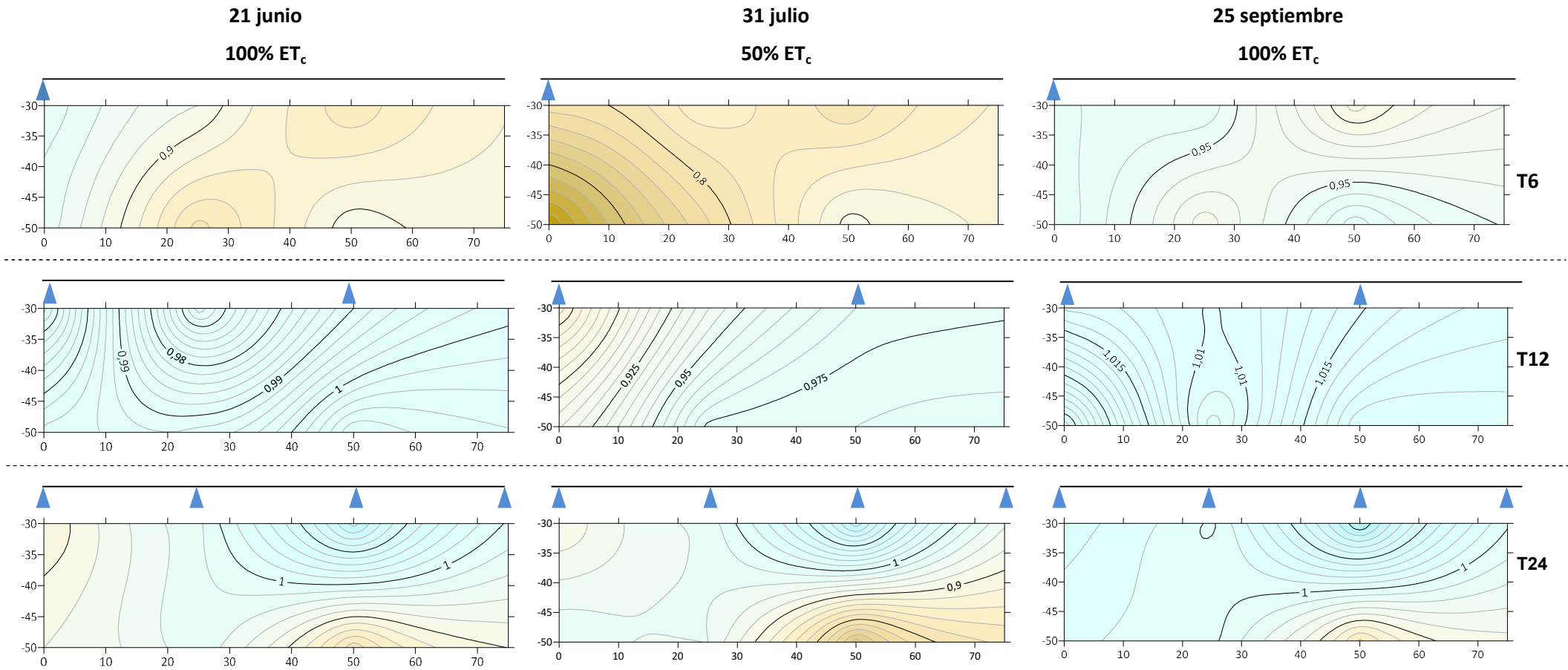


Figura 16: Representación de la variación espacial y temporal del contenido de agua del suelo expresada como porcentaje en tanto por uno de la capacidad de campo (θ / θ_{cc}) del 21 de junio, 31 de julio y 25 de septiembre, para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Un triángulo azul indica localización de un emisor.

4.2.3. Monitorización del frente húmedo mediante sondas de inducción electromagnética EC_a .

Las variaciones en la estimación de la superficie mojada se analizaron mediante la medida de la EC_a (Tablas 5 y 6). La EC_a es una medida indirecta de la humedad del suelo, en la que se asume que valores elevados de EC_a indican valores elevados de humedad del suelo, y viceversa. La EC_a se analizó a partir del valor medio del área evaluada (3,0 x 2,5 m) y sobre tres áreas paralelas al muro de anchuras 0 - 1 m, 1 - 2 m y 2 - 3 m.

En términos generales, los valores de EC_a mostraron diferencias significativas entre tratamientos de riego el 21 de junio (previo al inicio del periodo de déficit hídrico - 100% ET_c), pero no el 31 de julio (déficit hídrico - 50% ET_c) ni el 25 de septiembre (periodo de recuperación - 100% ET_c) (Tabla 5).

El 21 de junio se registró una temperatura media de 24,2° C y una ET_0 de 4,35 mm. En esas condiciones, los tratamientos de riego T12 y T24, con un mayor número de emisores, registraron una mayor EC_a , especialmente en la franja de suelo 1-2 m desde el punto de origen, en la que presentaron un aumento del 39,5% y 41,6% respectivamente, respecto T6. Además, a pesar de no aparecer diferencias estadísticamente significativas en el resto de sectores evaluados (0-1 y 2-3), el valor de la EC_a de los tratamientos T12 y T24 fue ligeramente superior que el del tratamiento T6 (Tabla 5).

El día 31 de julio, se registró una temperatura media de 26,2° C y una ET_0 de 3,97 mm. En esas condiciones, no aparecieron diferencias significativas en la EC_a entre los tratamientos. No obstante, T24 mostró los valores de EC_a más elevados, independientemente de la distancia al punto de origen (Tabla 5).

Finalmente, el día 25 de septiembre presentó una temperatura media de 26,1° C y una ET_0 de 3,12 mm. Cabe destacar que durante los días previos a la realización de las medidas se registró un total de 66 mm de precipitación. En esas condiciones, las diferencias en la humedad del suelo entre los tratamientos de riego desaparecieron como consecuencia de la precipitación, y, lógicamente, la EC_a del suelo no mostró diferencias significativas (Tabla 5).

Cabe destacar que la variación temporal de la EC_a demostró estar relacionada con la humedad del suelo, de modo que sí mostró variaciones en el contenido de humedad del suelo entre las tres fechas de evaluación en las que los aportes hídricos eran diferentes. Así, en el periodo de déficit hídrico, la EC_a fue estadísticamente inferior que en el resto de fechas, en concreto esta reducción se situó en torno al 40% (Tabla 6).

4. Resultados

Tabla 5: Medidas de electroconductividad aparente del suelo (EC_a , $mS \cdot m^{-1}$) en tres franjas de un metro de ancho y medida global, para los tratamientos (Trat.) de riego T6, T12 y T24 en las tres fechas de medida de la EC_a : 21 de junio (previo al periodo de déficit hídrico, 100%ET_c), 31 de julio (final del periodo de déficit hídrico, 100%ET_c) y 25 de septiembre (periodo de recuperación, 100%ET_c). P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos.

Trat.	EC_a ($mS \cdot m^{-1}$)			
	0-1 m	1-2 m	2-3 cm	Global
<i>Previo al periodo de déficit hídrico (100% ET_c) - 21 de junio 2019</i>				
T6	15,52± 2,06	13,34± 1, 84a	13,18± 2,23	14,24± 1,93
T12	24,82± 2,55	22,05± 2,72b	22,11 ± 2,77	23,35± 2,43
T24	23,34 ±4,14	22,83± 3,76b	20,69± 3,82	21,98± 3,74
P-valor	0,12	0,04	0,13	0,09
<i>Final del periodo de déficit hídrico (50% ET_c) - 31 de julio 2019</i>				
T6	12,77± 1,41	10,89 ± 1,20	9,95 ± 1,36	11,16 ± 1,21
T12	9,63 ± 1,13	10,95 ± 1,21	9,84 ± 1,35	9,06 ± 1,33
T24	15,55 ± 2,76	14,73 ± 2,46	12,39 ± 2,15	14,08 ± 2,42
P-valor	0,14	0,25	0,49	0,18
<i>Periodo de recuperación (100% ET_c) - 25 de septiembre 2019</i>				
T6	21,07± 1,80	19,23 ± 2,04	17,48 ± 2,34	19,10 ± 1,58
T12	18,19 ± 2,54	15,91 ± 2,16	15,01 ± 2,42	16,19 ± 2,17
T24	21,76 ± 0,16	20,32 ± 0,87	17,05 ±1,25	19,61 ± 0,61
P-valor	0,37	0,24	0,68	0,31

Tabla 6: Comparación de EC_a entre los tres días de medida: 21 de junio (previo al periodo de déficit hídrico, 100%ET_c), 31 de julio (final del periodo de déficit hídrico, 100%ET_c) y 25 de septiembre (periodo de recuperación, 100%ET_c). P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos.

Periodo	EC_a ($mS \cdot m^{-1}$)
Previo al periodo de déficit hídrico (100% ET_c) - 21 de junio 2019	19,86 ± 1,90 a
Final del periodo de déficit hídrico (50% ET_c) - 31 de julio 2019	11,43 ± 1,10 b
Periodo de recuperación (100% ET_c) - 25 de septiembre 2019	18,30 ± 1, 27a
P-valor	0,003

Los resultados anteriores concuerdan con la representación espacial de la EC_a mediante mapas realizados con el programa Surfer 8 (Figura 17). Valores elevados de EC_a indican valores elevados de humedad del suelo y viceversa.

Las variaciones de distribución de EC_a ponen de manifiesto diferencias en la distribución de la humedad del suelo entre tratamientos de riego. Así, el día 21 de junio, se observaron diferencias entre T12 y T24, respecto T6 en la zona comprendida entre 1 y 2 m, estos tratamientos de riego presentaron un mayor contenido de humedad del suelo (Figura 17).

4. Resultados

Por el contrario, la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos el día 31 de julio, se observó en todos ellos. Todos los tratamientos presentaron un valor reducido de EC_a en toda la superficie de estudio. Por lo que en este periodo de déficit hídrico, la disminución de la humedad fue independiente del tratamiento (Figura 17).

El día 25 de septiembre aumentó el nivel de humedad en todos los tratamientos sin diferencias significativas entre ellos. El valor más elevado de humedad se situó en la zona comprendida entre 0 y 1 m, mientras que en la zona más alejada del árbol (2-3 m) el nivel de humedad fue menor (Figura 17).

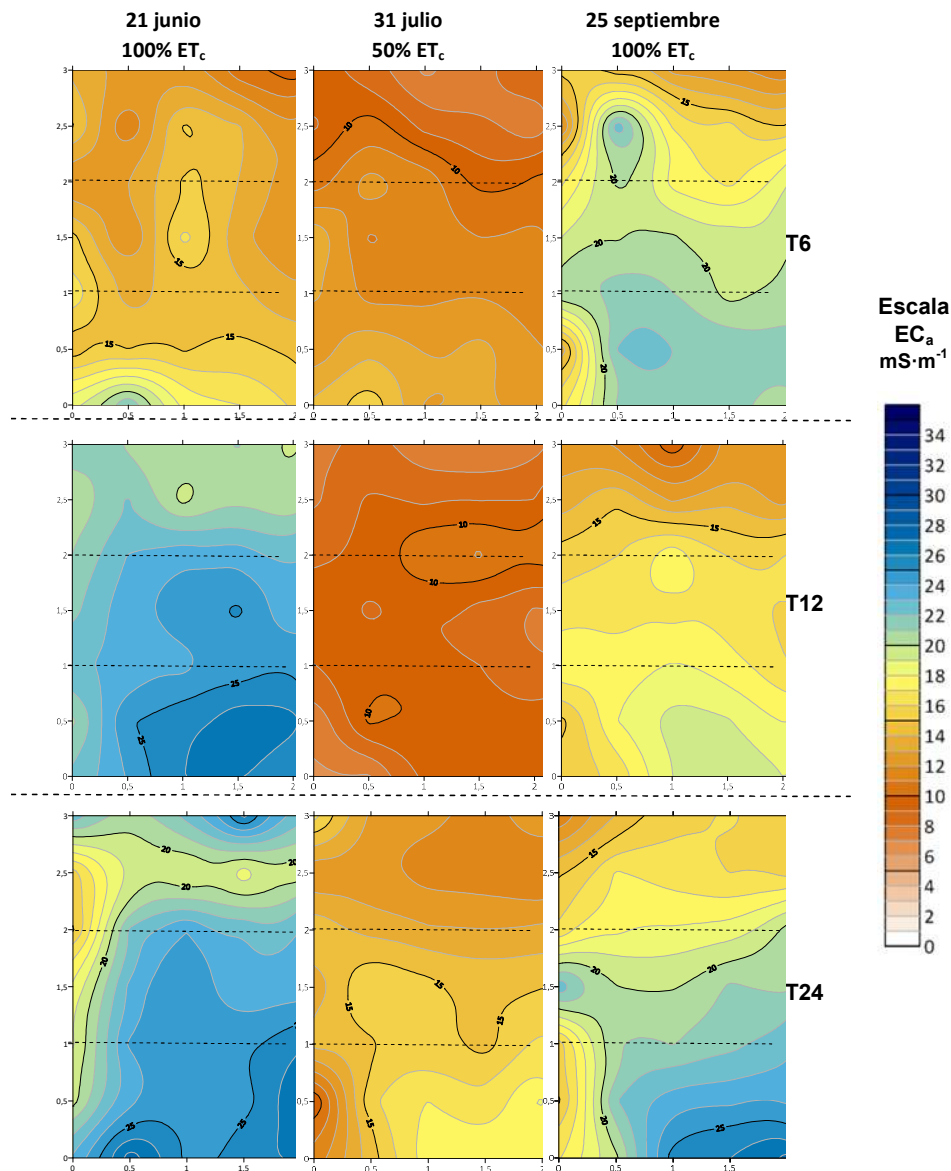


Figura 17: Variación espacial y temporal de las medidas de electroconductividad aparente del suelo (EC_a , $mS \cdot m^{-1}$) en las tres fechas de medidas 21 de junio (previo déficit), 31 de julio (déficit) y 25 de septiembre (post-déficit). P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas para los tratamientos de riego T6, T12 y T24. Las líneas discontinuas separaran las tres franjas de 0-1, 1-2 y 2-3 m. El origen (0,0) indica la situación del árbol. Plano horizontal.

4.2.4 Estado hídrico y parámetros de intercambio de gases

La modificación de la superficie mojada no tuvo influencia sobre las variables fisiológicas analizadas en ninguno de los tres momentos puntuales de estudio. Tampoco se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 7). Los árboles de los tres tratamientos mostraron valores similares de Ψ_{alba} y Ψ_{tallo} el 21 de junio, (100% ET_c), con valores de -0,2 MPa de Ψ_{alba} y valores comprendidos entre -0,9 y -1,0 MPa de Ψ_{tallo} . El 31 de julio, durante el periodo de déficit hídrico (50% ET_c), tanto el Ψ_{alba} como el Ψ_{tallo} descendió en todos los tratamientos, situándose en valores de -0,30 MPa para Ψ_{alba} y -1,30 MPa para el Ψ_{tallo} . Tras la reposición al completo de las necesidades de riego el 25 de septiembre, y junto con las precipitaciones registradas en este periodo (Figura 10), los valores de Ψ_{alba} y de Ψ_{tallo} aumentaron respecto al 31 de julio en los tres tratamientos de riego hasta -0,2 y -1,0 MPa, respectivamente. Durante el periodo de déficit hídrico, los parámetros de intercambio gaseoso fueron similares en los tres tratamientos de riego. Es decir, las diferencias en la distribución del agua en el suelo no se vieron reflejadas en el estado hídrico de la planta (Tabla 7).

Tabla 7: Variables fisiológicas: Potencial hídrico al alba (Ψ_{alba}), potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}), fotosíntesis neta (A_{CO_2} , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), transpiración (E , $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) y la conductancia estomática al vapor de agua (g_s , $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) para los tratamientos (Trat.) de riego T6, T12 y T24 en las tres fechas de medida de la EC_a: 21 de junio (previo al periodo de déficit hídrico, 100%ET_c), 31 de julio (final del periodo de déficit hídrico, 100%ET_c) y 25 de septiembre (periodo de recuperación, 100%ET_c). P-valor < 0,05 indica diferencias estadísticamente significativas.

Trat.	Ψ_{alba} (MPa)	Ψ_{tallo} (MPa)	A_{CO_2} ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	E ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
<i>Previo al periodo de déficit hídrico (100% ET_c) - 21 de junio 2019</i>					
T6	-0,21± 0,008	-0,98± 0,03	11,37±0,54	3,53± 0,20	0,174± 0,01
T12	-0,22± 0,010	-0,93± 0,04	10,18± 0,41	3,03 ±0,11	0,156±0,01
T24	-0,21± 0,008	-1,00± 0,04	10,34± 1,04	3,02± 0,23	0,140± 0,01
P-valor	0,07	0,40	0,22	0,15	0,24
<i>Final del periodo de déficit hídrico (50% ET_c) - 31 de julio 2019</i>					
T6	-0,30 ±0,015	-1,37± 0,03	10,67± 1,05	4,09 ±0,51	0,188± 0,03
T12	-0,29 ±0,012	-1,30± 0,04	10,67± 1,44	4,06 ±0,61	0,187± 0,04
T24	-0,27 ±0,014	-1,29± 0,04	9,49 ± 0,97	3,54± 0,32	0,156± 0,01
P-valor	0,29	0,31	0,47	0,18	0,43
<i>Periodo de recuperación (100% ET_c) - 25 de septiembre 2019</i>					
T6	-0,19±0,010	-1,02± 0,04	11,97± 0,65	3,84 ±0,20	0,194± 0,01
T12	-0,20±0,008	-1,01± 0,06	11,53± 0,45	3,65± 0,22	0,177± 0,02
T24	-0,20±0,006	-1,13± 0,06	10,83± 1,13	3,65 ±0,40	0,165± 0,02
P-valor	0,33	0,243	0,39	0,75	0,34

5. Discusión

Los estudios realizados hasta el momento para optimizar la eficiencia en el uso del agua en el cultivo del níspero japonés en condiciones de clima mediterráneo, se han centrado exclusivamente, en el empleo de técnicas de riego deficitario controlado con fines más agronómicos, basadas en la reducción del riego durante el periodo de poscosecha (parada estival) para favorecer la inducción floral (Ballester et al, 2018, Hueso y Cuevas, 2008) o durante la fase de maduración del fruto para favorecer la precocidad (Tasa, 2019). Considerando que esta estrategia de riego ya ha sido instaurada en la programación del riego, es necesaria la búsqueda de nuevas alternativas que ayuden a mejorar la eficiencia en el uso del agua. En este sentido, optimizar la superficie de suelo mojada es un aspecto que no ha sido estudiado en este cultivo. Por ello, el estudio de la viabilidad de nuevos diseños agronómicos de la instalación del riego, que permitan ampliar la superficie mojada y que mejoren la eficiencia de aplicación del agua en el suelo y el estado hídrico de la planta, resulta de gran interés.

Uno de los principales elementos innovadores de este estudio reside en la programación del riego basada en un sistema de *riego eficiente*, que ha consistido en ajustar la dosis de riego teórica (ET_c) teniendo en cuenta, los valores de humedad del suelo proporcionados por las sondas capacitivas y las medidas fisiológicas del estado hídrico de la planta, a través del potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}). Siguiendo esta metodología de programación del riego, se ha conseguido un ahorro anual considerable del aporte hídrico. Así, en el diseño de riego convencional (T6) el porcentaje de reducción fue del 33,5 % respecto al cálculo teórico de la ET_c , especialmente en el momento de máxima necesidad hídrica de la planta, la parada estival (Tabla 1). Aplicando esta metodología de programación del riego en nuevos diseños agronómicos de la instalación de riego, basados en el empleo de un mayor número de emisores de riego por árbol, aún se ha conseguido reducir más el volumen de agua de un 8 % en T12 y un 13,6 % en T24, respecto al diseño convencional, mejorando la eficacia de aplicación (Tabla 1).

El aumento del número de emisores por árbol (tratamientos T12 y T24) modificó el patrón de distribución de agua en el suelo, consiguiendo en ambos casos un aumento significativo de la superficie mojada del suelo respecto al diseño convencional (T6) (Figura 17). La caracterización de la superficie de suelo mojado mediante sondas capacitivas demostró que un mayor número de emisores de riego por árbol (en tratamientos T12 y T24), efectivamente, permitió mantener un mayor nivel de humedad del suelo, tanto superficialmente como en profundidad, incluso durante la época de mayor demanda evapotranspirativa y déficit hídrico (Figuras 11, 12,13 y 14). En el riego por goteo, el número de emisores determina el número de bulbos húmedos y su dimensión, y los resultados muestran que, si se reduce el espacio entre emisores, aumenta el volumen del suelo mojado, por lo que la disponibilidad de agua para la planta es mayor (Shan *et al.*, 2011). Al reducir el espacio entre emisores se consiguió un mayor

solapamiento entre bulbos húmedos, creando bulbos más anchos que el diseño convencional (T6), en el que los bulbos se situaron exclusivamente bajo los emisores, siendo éstos estrechos y profundos (Figura 16). Además, la utilización de emisores de bajo caudal (T24) permitió una mejor eficiencia de aplicación al reducir las pérdidas por percolación profunda. Todo esto, redujo el volumen de riego aplicados respecto al riego convencional (Tabla 2). Por todo ello, la combinación de un manejo de *riego eficiente* y un diseño agronómico adecuado de la instalación de riego conduce a una mejora de la eficiencia de aplicación de agua en la parcela.

Por otra parte, la caracterización de la superficie mojada mediante la EC_a , no fue del todo eficaz en la estimación de diferencias espaciales en la distribución de agua en el suelo entre tratamientos, bajo las mismas condiciones ambientales y régimen de riego (Tabla 6 y Figura 17). En cambio, el equipo sí que permitió detectar diferencias temporales de EC_a (Tabla 7). Este resultado contrasta con el obtenido por Padhi y Misra (2011), quienes consiguieron buenas estimaciones del contenido de agua del suelo a partir de datos de la EC_a dentro de la zona radical, además de detectar diferencias entre tratamientos con diferentes dosis de riego.

Respecto a la validez del equipo EM38, se ha observado que es un instrumento muy sensible a las condiciones ambientales, al que le afectan la presencia de metales a su alrededor, por lo que, probablemente, las condiciones en las que se realizó el ensayo no son las más adecuadas para la utilización de este tipo de dispositivo. La parcela experimental tiene importantes irregularidades en el terreno, y postes metálicos que sujetan las mallas cortavientos, que podrían interferir en la sensibilidad de la media. Además, dado que la EC_a es función de varias propiedades del suelo, entre las que se encuentran el contenido de sales solubles, contenido de arcilla y mineralogía, densidad aparente y materia orgánica (Corwin y Lesch, 2005b), la predicción precisa de la cantidad absoluta de agua del suelo es compleja mediante esta metodología.

La mejora de la disponibilidad de agua en el suelo, provocada por el incremento de la superficie mojada, mejoró el estado hídrico de la planta, pero solo en aquellos momentos en los que la demanda hídrica del níspero japonés fue elevada, es decir, durante la parada estival y en la fase de crecimiento lineal del fruto (Figura 7). En el caso de la parada estival, duplicar el número de emisores respecto al diseño convencional (de 6 a 12 emisores - T12), causó una mejora del estado hídrico del cultivo, aun habiendo aplicado una dosis de riego ligeramente inferior (Tabla 2, Figura 7). En el caso del sistema de emisores de bajo caudal (T24), aun reduciendo aproximadamente el 18% de la dosis de riego respecto al riego convencional, el estado hídrico de la planta no se modificó (Tablas 1 y 2; Figura 7). La interacción de efectos entre la dosis y la superficie mojada podría ser la razón que explica las diferencias entre el estado hídrico provocado por T12 y T24. No obstante, durante el verano de 2019 no se observaron diferencias en el estado hídrico de los diferentes diseños agronómicos (Tabla 10), probablemente debido a que la demanda evapotranspirativa no fue tan exigente respecto a la de 2018 en los tres días puntuales en los que se realizó la medición (Figura 10). De hecho, no

se alcanzaron valores tan negativos de potencial hídrico de tallo como el año anterior (Figura 7, Tabla 10) ni los parámetros de intercambio gaseoso se modificaron (Tabla 10). Por otra parte, durante la fase de crecimiento lineal del fruto, la demanda hídrica aumenta, principalmente, para satisfacer su crecimiento (Gariglio *et al.*, 2003). En esas condiciones, la mejora de la disponibilidad del agua en el suelo por el aumento del número de emisores (T12 y T24) provocó una mejora del estado hídrico del árbol (Figura 7). Los resultados obtenidos concuerdan con los descritos por Martínez-Gimeno *et al.*, (2018) en mandarino cv "Clementina de Nules". En esta especie, en la que coincide el desarrollo del fruto con la elevada demanda evapotranspirativa estival, el estado hídrico fue mejor en los árboles del tratamiento con un mayor número de emisores por árbol, principalmente cuando la demanda hídrica fue máxima. Resultados similares también han sido observados en almendro (Espadafor *et al.*, 2018). La mayor disponibilidad de agua en el suelo podría haber promovido el desarrollo del sistema radicular del níspero japonés, facilitando así la absorción de agua y mejorando su estado hídrico.

Los diseños de agrónomos de riego evaluados no causaron un impacto directo sobre los frutos afectados por las dos fisiopatías más importantes del cultivo de níspero japonés, la *mancha púrpura* y el *rajado de fruto* (Tabla 5), a pesar de que las dos están relacionadas con cambios en las relaciones hídricas de los frutos (Gariglio *et al.*, 2002). La *mancha púrpura* es una alteración fisiológica que afecta a la epidermis del fruto, que se deshidrata y muere, y está estrechamente relacionada con el cultivar y la tasa de crecimiento del fruto (Agustí y Reig, 2006). Esto sugiere que la incidencia de la mancha púrpura está más relacionada con factores varietales que con la estrategia de riego adoptada, además, la mejora del estado hídrico del árbol no debe haber influido en la tasa de crecimiento del fruto, como también demuestra el hecho de que el calibre final de la cosecha no difirió entre los tratamientos (Figura 8). El problema de *rajado del fruto* de níspero japonés se produce por un aumento considerable de la tasa de crecimiento de la pulpa debido a la absorción de agua, que supera la capacidad de flexión de la piel que se rompe apareciendo grietas (Agustí y Reig, 2006). La precipitación en la fase final del desarrollo del fruto es uno de los principales desencadenantes de esta alteración también en otros cultivos como el cerezo, el manzano o los cítricos (Opara *et al.*, 1997). En este caso, la elevada precipitación registrada durante la fase de maduración de los frutos (50 mm) (Figura 6), que provocó una elevada cantidad de frutos rajados, tuvo un mayor efecto que las estrategias de riego sobre la incidencia de esta fisiopatía.

El crecimiento del fruto es un periodo sensible al déficit hídrico, en el que cualquier alteración del estado hídrico de la planta podría afectar al tamaño de los frutos (Agustí, 2008). A pesar de la reducción del volumen de agua aplicada es esta fase respecto al riego convencional (Tabla 1), el tamaño final de los frutos no se vio modificado (Figura 8, Tabla 4). Esto fue debido a que, si las necesidades hídricas están cubiertas, el tamaño final de los frutos en este cultivo depende, principalmente, del número de frutos por árbol, que se selecciona manualmente

mediante la técnica de aclareo (Gariglio *et al.*, 2003). Además, el crecimiento de los frutos del níspero japonés tiene lugar en invierno e inicios de primavera, momento en el que la demanda evapotranspirativa es reducida. Estos resultados indican que en un periodo de baja demanda, el cómo se aplique el agua en el suelo carece de importancia, ya que en los tres casos el volumen de suelo mojado fue suficiente para mantener el estado hídrico de la planta adecuado para satisfacer el crecimiento del fruto.

Algunos estudios han establecido que una reducción del volumen de riego puede limitar la productividad del cultivo (Bryla *et al.*, 2003, 2005). En nuestro caso, los diseños de riego con mayor número de emisores favorecieron el ahorro de agua respecto al diseño de la instalación de riego convencional (Tabla 1), sin disminuir el rendimiento de la cosecha (Tablas 2 y 4). Esto fue debido a que el rendimiento depende del tamaño individual del fruto y este no se vio modificado. A pesar de los ahorros de agua, estos no se vieron reflejados en un aumento de la eficiencia en el uso del agua (Tabla 3). En estudios previos, Pastor *et al.* (1997) observaron que, aumentando el número de emisores por árbol, la productividad del olivo aumentaba, y del mismo modo, un aumento de la superficie mojada en naranjos adultos aumentó el rendimiento (Moreshet *et al.* 1983). A pesar de que en estos estudios la producción se vio favorecida por el mayor porcentaje de la superficie humedecida del suelo por el riego, no fue posible separar claramente los efectos de mayor volumen de suelo humedecido respecto de mayores cantidades de agua aplicada, ya que el mayor volumen de suelo mojado fue resultado del aumento de volumen de agua aplicada porque las áreas húmedas más grandes siempre fueron obtenidas al aumentar el volumen de agua aplicada. No así, en el estudio realizado por Martínez-Gimeno *et al.*, (2019), en el que el volumen de riego aplicado fue similar para los diferentes diseños de riego, en este caso, un aumento en el número de emisores por planta no modificó el rendimiento del cultivo. Así, como punto esencial e innovador del trabajo, el aumento de la superficie de suelo mojado no modificó el rendimiento del cultivo, a pesar de la reducción del volumen de agua aplicada. Estos resultados ponen de relieve la importancia que tiene distribuir bien el agua en el suelo, de forma que la planta pueda emplearla eficientemente.

6. Conclusión

El aumento del volumen de suelo mojado por efecto del aumento del número de emisores por árbol, tuvo un efecto positivo sobre la eficiencia de aplicación del agua de riego. Un aumento del volumen de suelo húmedo condujo a una mejor disponibilidad hídrica, que mejoró el estado hídrico de las plantas en los momentos de máximo requerimiento hídrico. Todo ello adquiere mayor importancia en climas áridos o semiáridos, en los que el suelo está seco durante la mayor parte del año y la demanda hídrica y evapotranspirativa es elevada en ciertas fases del periodo fenológico.

El presente estudio demuestra que se puede conseguir un ahorro significativo de agua modificando las prácticas de riego convencional, además de mejorar el estado hídrico del cultivo. Así, los nuevos diseños de la instalación de riego, basados en un mayor número de emisores por planta permitieron, mediante el solapamiento de bulbos húmedos y la reducción de la percolación profunda, mantener un mejor estado hídrico, con volúmenes de agua inferiores al diseño convencional. El efecto fue especialmente importante en aquellos momentos en los que la demanda fue elevada, logrando un manejo de riego más eficiente sin afectar negativamente el rendimiento del cultivo y mejorando la eficiencia de aplicación. Además, los resultados particulares de este estudio indican la buena adaptación del cultivo del níspero a las condiciones de clima mediterráneo y su rusticidad.

7. Bibliografía

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300 (9).

Agustí, M., Reig, C. (2006). Fisiología. En: El cultivo del níspero japonés, Agustí, M., Reig, C. y Undurraga, P. (Eds.), Gráficas Alcoy, España, pp 97-129.

Agustí, M. (2008). Crecimiento y maduración del fruto. En: Fundamentos de fisiología vegetal, Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (Eds.), McGraw-Hill Interamericana de España SAU y Ed. Universitat de Barcelona. Madrid, España, pp. 519-536.

Agustí, M. (2010). Otros frutales de zonas templadas. En: Fruticultura, Agustí, M. (Ed.), Mundi-Prensa, Madrid, España, pp 407-413.

Ballester, C., Buesa, I., Soler, E., Besada, C., Salvador, A., Bonet, L., Intrigliolo, D.S. (2018). Postharvest regulated deficit irrigation in early- and intermediate-maturing loquat trees. *Agricultural Water Management*, 205:1–8.

Bonet, L., Ferrer, P.J., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S. (2010). Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards?. *Spanish Journal of Agricultural Research*, S2: S52–S65.

Bryla, D.R., Trout, T.J., Ayars, J.E. (2003). Growth and production of young peach trees irrigated by furrow, microjet, surface drip, or subsurface drip systems. *Horticultural Science*, 38: 1112-1116.

Bryla, D.R., Dickson, E., Shenk, R. (2005). Influence of irrigation method and scheduling on patterns of soil and tree water status and its relation to yield and fruit quality in peach. *Horticultural Science*, 40: 2118-2124.

Calabrese, F. (2006). Origen de la especie. En: El cultivo del níspero japonés, Agustí, M., Reig, C. y Undurraga, P. (Eds.), Gráficas Alcoy, España, pp 17-25.

CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). (2012). Estudio de los impactos del cambio climático y las masas de agua. Efectos potenciales del cambio climático en las demandas de agua y estrategias de adaptación. Ministerio de Fomento, Madrid, España.

Corwin, D.L., Lesch, S.M. (2005a). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in Agriculture*. 46: 11-43.

Corwin, D.L., Lesch, S.M. (2005b). Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity Part II. Case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46: 135–152.

Cuevas, J., Salvador-Sola, F., Gavilan, J., Lorente, N., Hueso, J. (2003). Loquat fruit sink strength and growth pattern. *Scientia Horticulturae*, 68:131-137.

Clothier, B.E., Green, S.R. (1995). Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 25:1-12.

Espadafor, M., Lorite, I. J., Gavilán, P., Berengena, J. (2011). An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain. *Agricultural Water Management*, 98(6): 1045-1061.

7. Bibliografía

Espadafor, M. (2015). Manejo del agua en plantaciones de almendro: demanda hídrica y respuesta al volumen de suelo mojado en plantaciones jóvenes. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba, España.

Espadafor, M., Orgaz, F., Testi, L., Lorite, I.J., García-Tejera, O., Villalobos, F.J., Fereres, E. (2018). Almond tree response to a change in wetted soil volume under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 202: 57–65.

Fereres E., Orgaz F., Gonzalez-Dugo V., Testi L., Villalobos F.J. (2014) Balancing crop yield and water productivity tradeoffs in herbaceous and woody crops. *Functional Plant Biology*, 41:1009–1018.

Gardner, W. R. (1960). Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil science*, 89(2): 63-73.

Gariglio, N., Castillo, A., Juan, M., Almela, V., Agustí, M. (2002). El níspero japonés: Técnicas para mejorar la calidad del fruto. Ed. Generalitat Valenciana. Conselleria d'Agricultura, Pesca i Alimentació, València, España.

Gariglio, N., Castillo, A., Juan, M., Almela, V., Agustí, M. (2003). Effects of fruit thinning on fruit growth, sugars and purple spot in loquat fruit (*Eriobotrya japonica* Lindl.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78(1): 32-34.

Gispert J.R., Ramírez de Cartagena F., Villar J.M., Girona J. (2012) Wet soil volumen and strategy effects on drip-irrigated olive trees (cv. 'Arbequina'). *Irrigation Science*, 31:479-489.

Hsiao, T. C., Steduto, P., Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation science*, 25(3): 209-231.

Hueso, J., Cuevas, J. (2010). Ten consecutive years of regulated deficit irrigation probe the sustainability and profitability of this water saving strategy in Loquat. *Agricultural Water Management*, 97: 645–650.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019). Consultado el 30/11/2019. <https://archive.ipcc.ch>.

Kramer, P.J. (1988.) Changing concepts regarding plant water relations. *Plant Cell Environment*, 11:565-568.

Levin, I., Assaf, R., Bravdo, B. (1979). Soil moisture and root distribution in an apple orchard irrigated by tricklers. *Plant and Soil*, 52 (1): 31-40.

Lin, S., Sharpe, R., Janick, J. (1999). Loquat: botany and horticulture. *Horticultural review*, 23: 233- 275.

Lin, S. (2007). World loquat production and research with special reference to China. *Acta Horticulturae*, 750:37-43.

Llácer, A. (2008). Situación actual, problemas y perspectivas del níspero japonés en España. *Vida Rural*, 70-72.

MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). (2019). Consultado el 14 / 06 / 2019, a Superficies y producciones anuales de cultivo: <https://www.mapa.gob.es/ca/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/>.

7. Bibliografía

Martínez-Calvo, J., Badenes, M.L., Llácer, G. (2000). Descripción de variedades del níspero japonés. Ed. Generalitat Valenciana, Valencia, España.

Martínez-Gimeno, M.A., Bonet, L., Provenzano, G., Badal, E., Intrigliolo, D.S., Ballester, C. (2018). Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 206: 209-216.

McNeill, J.D. (1980). Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers, Ed. Geonics Limited, Ontario, Canada.

Moreshet, S., Cohen, Y., Fuchs, M. (1983). Response of mature 'Shamouti' orange trees to irrigation of different soil volumes at similar levels of available water. *Irrigation Science*, 3: 223-236.

Morton, J. F., Dowling, C. F. (1987). Fruits of warm climates. Ed. Creative Resource Systems, Miami, USA.

Myers, B.J. (1988). Water stress integral – a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiology*. 4: 315-323.

Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., Montero-Martínez, M. (2011). Climate change impact on crop development and water. *Agrociencia*, 45: 1-11.

Opara, L.U., Studman, C., Banks, N. (1997). Fruit skin splitting and cracking. *Horticultural reviews*, 19: 217-262.

Padhi, J., Misra, R.K. (2011). Sensitivity of EM38 in determining soil water distribution in an irrigated wheat field. *Soil & Tillage Research*, 117: 93–102.

Pastor M., Orgaz F., Vega V., Hidalgo J., Castro J. (1997). Programación del riego en olivares de la provincia de Jaén. *Riegos y drenajes XXI*, 103:43–53.

Pereira, L. S., Cordery, I., Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural water management*, 108: 39-51.

Pereira, L. S., de Juan, J. A., Picornell, M. R., Tarjuelo, J. M. (2010). El riego y sus tecnologías. Ed. CREA-UCLM, Albacete, España.

Polat, A.A. (2007). Loquat production in Turkey: Problems and solutions. *European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 1 (2): 187–199.

Quiñonez, A., Legaz, F. (2006). Fertilización y nutrición mineral. En: El cultivo del níspero japonés, Agustí, M., C. Reig, C. y Undurraga, P. (Eds.), Gráficas Alcoy, España, pp 131-161.

Rallo, G., Agnese, C., Minacapilli, M., Provenzano, G. (2011). Comparison of SWAP and FAO agro-hydrological models to schedule irrigation of wine grapes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138 (7), 581–591.

Reig, C., Agustí, M. (2006). Morfología y anatomía. En: Agustí, M., Reig, C y P. Undurraga, P. (Eds), El cultivo del níspero japonés. Gráficas Alcoy, España, pp 49-72.

Rodríguez, A. (1983). El cultivo del níspero y el Valle de Algar-Guadalest. Ed. Callosa d'en Sarrià: Sociedad Cooperativa de Crédito, Callosa de Ensarrià, España.

Rodríguez-Sinobas, L., Provenzano, G., Roldán-Cañas, J. (2016). Special issue: water management strategies in irrigated areas. *Agricultural Water Management*, 170: 1-4.

Sánchez-Díaz, M. S., Aguirreolea, J. (2008). Absorción de agua por la raíz y transporte por el xilema: balance hídrico de la planta. En: Fundamentos de fisiología vegetal, Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (Eds.), McGraw-Hill Interamericana de España SAU y Ed. Univ. Barcelona. Madrid, España, pp. 57-79.

Scholander P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemmingsen, E.A. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148: 339-346.

Shan, Y., Wang, Q., Wang, C. (2011). Simulated and measured soil wetting patterns for overlap zone under double points sources of drip irrigation. *African Journal of Biotechnology*, 10 (63): 13744 -3755.

Soler, E., Martínez-Calvo, J., Llácer, G., Badenes. M.L. (2007). Loquat in Spain: production and marketing. *Acta Horticulturae*, 750: 45- 47.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Alexander, L.V., Allen, S.K., Bindoff ,N.L., Bréon, F.M., Church, J.A., Cubasch ,U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J.M., Hartmann, D.L., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Krishna Kumar, K., Lemke, P., Marotzke, J., Masson-Delmotte, V., Meehl, G.A., Mokhov, I.I., Piao, S., Ramaswamy, V., Randall, D., Rhein, M., Rojas, M., Sabine, C., Shindell, D., Talley, L.D., Vaughan, D.G., Xie, S.P. (2013). Technical Summary. En: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Stocker, T.F., Qin, D., Plattner ,G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–115.

Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Kitchen, N.R. (2001) Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 31: 239–264.

Tasa, M. (2019). Riego deficitario controlado precosecha para inducir precocidad en níspero japonés [*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.]. Tesis de fin de máster. Universitat Politècnica de València, España.

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

U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, USDA Handbook 60. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA.

Von Caemmerer, S. V., Farquhar, G. D. (1981). Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta*, 153(4):376-387.