

Resumen

Riego de precisión para la eficiencia hídrica en la agricultura mediterránea.

La sostenibilidad de la agricultura de regadío en la cuenca mediterránea está supeditada al uso eficiente de los recursos ante los probables escenarios de aumento demográfico y de cambio climático. Las nuevas redes de tecnologías digitales (Internet de las Cosas, IoT) que recopilan múltiples datos y facilitan la toma de decisiones, se presentan como un aliado para la correcta determinación y aplicación del agua de riego. La presente Tesis Doctoral se enmarca en torno a los tres ejes que requiere cualquier riego para considerarse eficiente: 1) selección del sistema de distribución de agua, 2) determinación de las necesidades de riego y, 3) control del estado hídrico de la planta.

El ensayo detallado en el **Capítulo II** se centró en la **selección del sistema de riego por goteo** que mejor se adaptara a las particularidades del cultivo de los cítricos. Se evaluaron las posibles ventajas que pudiera aportar el riego por goteo subterráneo y la instalación de laterales de riego con una mayor densidad de emisores por planta. Concretamente se estudió la respuesta productiva de mandarino (*Citrus clementina*, Hort. Ex Tan. 'Arrufatina') en función de diversos sistemas de riego superficial (SI) y subterráneo (SSI) con 7 (SI₇, SSI₇) y 14 emisores (SI₁₄, SSI₁₄) por planta dispuestos en doble línea, así como un tercer tratamiento subterráneo (SSI_A), idéntico a SSI₇, pero equipado con una línea adicional subterránea situada entre filas de árboles. El efecto de los tratamientos se evaluó en base a producción, calidad de la fruta, productividad del agua (WP) y ahorro de agua. Los resultados mostraron que el ahorro de agua empleando el sistema SSI, en comparación con SI, puede llegar a ser del 23% sin mermas en la producción ni en la calidad

Resumen

de la fruta, incrementando por lo tanto la WP. El sistema SSI_A fue el tratamiento que empleó menor volumen de agua de riego y obtuvo mayor rendimiento productivo en comparación con SI₇, alcanzado ahorros de agua entre el 22 y el 28%. Estos resultados demuestran las posibilidades que ofrece el riego subterráneo para optimizar el consumo de agua en la citricultura mediterránea.

En el **Capítulo III** se propone una metodología de **cálculo de las necesidades de riego** para mandarinos basada en el uso de sondas de humedad de tipo capacitivo (e.f. FDR). El procedimiento de cálculo se define en tres fases secuenciales: i) determinación de umbrales de humedad de suelo adaptados a los requerimientos de las plantas en distintas fases fenológicas; ii) estandarización de las lecturas de las sondas capacitivas mediante un programa de simulación hidrológica que permita reducir los efectos de la variabilidad intrínseca de los equipos; y por último iii) un procedimiento para extrapolar los umbrales de humedad definidos en el trabajo a cualquier parcela con distintas características edáficas. La validación de esta estrategia en una parcela de cítricos (*Citrus clementina*, Hort. Ex Tan. 'Arrufatina') supuso un ahorro de agua del 26% sin reducciones significativas en la producción, mejorando la WP un 33%. La determinación y uso de umbrales de referencia junto con sondas de humedad puede ser una alternativa práctica en el cálculo de necesidades y en el manejo de riego por goteo.

En los ensayos descritos en el **Capítulo IV** se realiza la **evaluación de los sensores de turgencia de hojas (Yara ZIM-probe) como indicadores del estado hídrico de la planta** para poder, en un futuro, integrar dichas determinaciones

Resumen

en un marco más general de la programación del riego. Esta tecnología, a través de dos placas imantadas y un transductor de presión, proporciona una señal (P_p) que es inversamente proporcional a la presión de turgencia. Un primer experimento se realizó en caqui (*Diospyros kaki* L.f.), evaluando los sensores de turgencia en un ensayo de campo con distintas dosis de riego y portainjertos con diferente tolerancia a la sequía [*Diospyros lotus* (L) y *Diospyros virginiana* (V)]. La información que proporcionaba el sensor se comparó con medidas de potencial hídrico de tallo al mediodía solar (Ψ_{stem}) y variaciones del diámetro del tronco. El estudio determinó que el análisis visual de las curvas de los valores diarios de P_p , es un buen indicador del estado hídrico de la planta. La evolución del P_p junto con los valores de Ψ_{stem} , permitió establecer tres estados de turgencia asociados a estados hídricos concretos. Los árboles insuficientemente regados con Ψ_{stem} por debajo de los -0.8 MPa, mostraron curvas P_p con signos de inversión (valores máximos durante la noche). Así mismo, con la información procedente de los sensores fue posible diferenciar el estado hídrico entre patrones, señalando a L como el portainjerto más sensible al déficit hídrico. El segundo experimento se realizó en mandarino (*Citrus clementina*, Hort. Ex Tan. 'Arrufatina'). Del mismo modo, los valores de P_p se compararon con las medidas de Ψ_{stem} . En este caso, las curvas prácticamente no sufrieron inversiones cuando el estado hídrico de la planta era inadecuado, pero sí se determinó un aumento de los valores de P_p mínimos y máximos registrados por la noche y al mediodía, respectivamente. Así mismo, se realizaron dos ciclos de medidas horarias que mostraron que existe una buena correlación entre P_p y Ψ_{stem} (coeficiente de determinación, $r^2 = 0.40 - 0.74$). Los resultados de estos estudios muestran que el sensor Yara

Resumen

ZIM-probe podría emplearse para control continuo del estado hídrico del cultivo, aunque serían necesarios más estudios para implementar su uso en la programación del riego. Se ha puesto también de manifiesto cómo la especie vegetal empleada puede influir en la curva de respuesta de P_p al estrés hídrico, lo que en definitiva puede complicar el uso de este tipo de sensores a nivel comercial.

Las estrategias y tecnologías investigadas han demostrado que es posible optimizar la eficiencia del uso del agua en parcela. Con la implementación de sistemas de riego subterráneo se puede reducir el uso consuntivo de agua, obteniendo ahorros netos en el consumo hídrico. Mediante la estimación de la dosis de riego a través de sensores de humedad, se mejora la eficiencia en la aplicación del riego y se reducen así las pérdidas por percolación profunda, minimizando el lavado de nutrientes y con ello, el riesgo de contaminación de los acuíferos. En todo caso, sería recomendable estudiar la viabilidad de estas propuestas en el contexto global e integral de la gestión de los recursos hídricos a nivel de un distrito de riego y cuenca hidrográfica.