

RESUMEN

El sector de la citricultura, de gran importancia económica y social a nivel mundial, se enfrenta al desafío de satisfacer la creciente demanda de cítricos en un mercado globalizado, asegurando los requerimientos de calidad, seguridad alimentaria y sostenibilidad de las explotaciones. Para incrementar la producción, la agricultura de precisión impulsa el uso de herramientas para la mecanización, la automatización y la digitalización de procesos mediante la tecnificación de las operaciones agrícolas. Mientras que otros cultivos como la vid, el almendro y el olivar han avanzado en el desarrollo de sistemas productivos intensivos lo que ha permitido la implementación de estas tecnologías, los cítricos, con sistemas productivos tradicionales, presentan aún un bajo grado de tecnificación.

El objetivo de esta Tesis Doctoral es generar conocimiento y tecnología que permitan desarrollar soluciones mecanizadas y automatizadas mediante la aplicación de sensores para monitorizar, optimizar tareas y aumentar la productividad en los cultivos de cítricos y, por ende, la competitividad del sector cítrico. Con este fin, se ha trabajado en la aplicación de tecnologías en algunas de las operaciones más importantes y costosas en la citricultura.

En el ámbito de la recolección, con el objetivo de facilitar y optimizar el proceso de recolección de cítricos para consumo en fresco, se implementaron mejoras estructurales y funcionales en un prototipo de plataforma autopropulsada de asistencia para garantizar la seguridad de los trabajadores y minimizar los riesgos laborales, asegurar la calidad de la fruta recolectada y clasificarla adecuadamente en función de su calidad por un sistema de visión artificial. Tras la implementación de estos avances, se evaluó su funcionalidad en condiciones reales de campo y se determinó el rendimiento de la operación de recolección asistida. Los resultados mostraron que el rendimiento operativo teórico en el proceso de recolección con la asistencia del prototipo fue de $36,50 \text{ h}\cdot\text{ha}^{-1}$, un 17 % menor que en la recolección manual tradicional, que fue de $44,12 \text{ h}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Asimismo, con la finalidad de generar de manera automática mapas de rendimiento en cítricos accesibles al agricultor, se creó una nueva herramienta digital a modo de cuadro de mando, denominada *CitrusYield*. Esta herramienta es capaz de obtener mapas que muestran la variabilidad de las características medidas por los sensores instalados en el prototipo, haciendo uso de la información proporcionada al inspeccionar cada fruta y de los datos obtenidos por los dispositivos de geolocalización, permitiendo también conocer el rendimiento de la producción a nivel intraparcialario. Se evaluó el funcionamiento de *CitrusYield* con datos reales obtenidos por el prototipo en campo. El cuadro de mando analizó los datos y generó diferentes tipos de mapas georreferenciando la información de la fruta con su punto de recolección. A través de estos mapas, *CitrusYield* demostró su capacidad para reflejar la heterogeneidad de la producción dentro de la parcela. Estas diferencias de producción entre zonas dentro del cultivo también se cuantificaron en las tablas y gráficos generados por la herramienta. Los indicadores de calidad, rendimiento del sistema de inspección por visión artificial y la productividad, calculados por *CitrusYield*, revelaron el grado de efectividad y eficiencia del proceso de recolección con la asistencia del prototipo.

En el ámbito de la detección temprana de plagas y enfermedades, se llevó a cabo la investigación del potencial de la imagen en color y de la imagen hiperespectral para la detección automática de daños causados por la plaga *Tetranychus urticae* en hojas de cítricos. Además, se diferenciaron en función de la antigüedad y de otros problemas que puede tener el árbol causados por deficiencias nutricionales o por otras plagas. En el análisis para identificar el daño causado por esta plaga, se obtuvo una tasa de éxito del 92,5% en las imágenes en color. No obstante, no se pudo discriminar la edad del daño con este método. En las imágenes hiperespectrales, el éxito fue del 100% en la detección del daño y del 92% en la discriminación

de la edad. En cuanto a la discriminación de daños de *T. urticae* respecto a otros daños, en las imágenes en color se obtuvo una tasa de éxito del 100% en la discriminación de *Phyllocnistis citrella* en el envés de las hojas. Las deficiencias de N no pudieron discriminarse correctamente y las deficiencias de Fe, Mn o Zn se detectaron acertadamente en el 50% de los casos. En las imágenes hiperespectrales, los daños por *P. citrella* se discriminaron con éxito en el 100% de los casos, tanto en el haz como en el envés de las hojas. Las deficiencias por N se discriminaron correctamente en más del 65% de los casos también en ambos lados de la hoja. No obstante, las deficiencias de Fe, Mn o Zn no pudieron ser discriminadas correctamente, siendo el porcentaje de daño clasificado acertadamente inferior al 50%.

Las conclusiones de esta Tesis Doctoral ponen de manifiesto el gran potencial de implementar estas tecnologías para monitorizar, optimizar tareas y digitalizar los procesos en las labores llevadas a cabo en los campos de cítricos, de manera que se logra aumentar la eficiencia, productividad y, también, la competitividad en el sector.

Las principales contribuciones de esta investigación se reflejan en la transferencia tecnológica a través de la creación de la herramienta digital inscrita en el registro de propiedad intelectual y en la publicación de los resultados en revistas científicas indexadas en el JCR, en revistas técnicas y de divulgación, en congresos nacionales e internacionales y en capítulos de libros de carácter internacional.