

# **La mejora genética del almendro en el CITA: retos del futuro**

**María José Rubio-Cabetas<sup>1,2</sup>, Clara Cordoba<sup>1,2</sup>, Virginia Ruiz-Artiga<sup>1</sup>, Beatriz Bielsa<sup>1,2</sup>, Jérôme Grimplet<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ciencia Vegetal. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA). Avda. Montañana 930, 50059, Zaragoza, España.

<sup>2</sup>Instituto Agroalimentario de Aragón – IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), Zaragoza, España.

## **Resumen**

**España sigue siendo el tercer productor de almendra por detrás de Australia y EE. UU. En 2024, se registró una producción mundial de 3.513.970,067 t sobre una superficie de 2.322.067 ha; el mayor productor mundial es EE. UU. con 1.791.692 t, seguido de España (297.660 t), Australia (260.000 t), y Turquía (170.000 t).**

**El cultivo del almendro está considerado como un cultivo de alto valor, debido a la alta producción que se puede obtener con las nuevas variedades autocompatibles y de floración tardía adaptadas a distintas condiciones edafoclimáticas que va acompañado por el uso de nuevos portainjertos que controlan el vigor. Las nuevas plantaciones de almendro son el resultado de avances tecnológicos tanto en material vegetal como en el manejo de estas, que permiten reducir el uso de mano de obra tan escasa en la agricultura. Todo ello hace disminuir el uso de mano de obra, haciendo el manejo de las plantaciones de almendro más sostenibles económicamente. Aun así, quedan algunos aspectos importantes sin resolver, como la búsqueda de alternativas que permitan reducir los agroquímicos convencionales, y proporcionen equilibrio entre productividad y sostenibilidad.**

## **INTRODUCCIÓN**

Las plantaciones monovarietales y en regadío que se han implantado en la última década han permitido una mayor facilidad en la gestión de las prácticas agronómicas y en el manejo comercial de la producción. La introducción de variedades de floración tardía y extratardía, ha reducido significativamente el daño por heladas por medio del escape a las mismas. Por ello, las primeas variedades, resultado de los trabajos de mejora genética, fueron la selección de nuevas variedades autógamas con alta calidad de fruto, como fue 'Guara'. Entre las variedades obtenidas por el CITA, se encuentran Soleta<sup>®</sup> e Isabelona<sup>®</sup>,

dos variedades autógamas, de floración tardía y con relativa tolerancia a las heladas primaverales (Socias i Company y Felipe, 2007); y Felama®, variedad de reciente obtención (Rubio-Cabetas et al., 2024). Como variedades de floración extratardía, se seleccionaron Vialfas® y Mardía® (Tabla 1) (Socias i Company et al., 2008, 2015). Por otro lado, la elección del patrón es también un factor determinante en el diseño de las plantaciones modernas ya que afecta a características finales del árbol como son su vigor, anclaje, tamaño, productividad y calidad de fruto, así como su tolerancia a estreses abióticos y bióticos (Felipe et al., 2022). Con la expansión del cultivo en regadío era necesario incorporar la resistencia a nematodos presentes en el sur de España. El CITA desarrolló la serie de híbridos rojos 'Garfi' × 'Nemared' (G×N) Garnem®, Felinem® y Monegro® (Felipe, 2009), y Pilowred® (Bielsa et al., 2023), que entre sus características destaca la resistencia a nematodos agalladores del género *Meloydogyne* spp. El híbrido de reciente comercialización, Pilowred®, reduce considerablemente el vigor y tiene menos necesidades de frío, aspecto importante en un contexto climático de falta de horas de frío en muchas áreas frutícolas, además de su mayor uso eficiente del agua (Bielsa et al., 2018) y tolerancia a clorosis. En la actualidad, se está trabajando en la incorporación de tolerancias tanto a estreses abióticos, como bióticos, como la serie Rootpac® que incorpora tolerancias a estreses abióticos y resistencias a enfermedades con gran relevancia, como la podredumbre de raíces causada por *Phytophthora* y *Armillaria mellea*.

## **METODOLOGÍA**

Para los estudios de mejora genética de variedades y portainjertos desde el CITA se están empleando estrategias -ómicas. Estas permiten la selección precisa de caracteres de interés, ya que es posible identificar regiones génicas relevantes y desarrollar marcadores moleculares asociados a caracteres de interés agronómico. Adicionalmente, en el CITA se han llevado a cabo estudios de genotipado mediante arrays de SNPs y secuenciación de nueva generación (NGS), lo que ha permitido analizar la diversidad genética y la estructura poblacional del almendro para la identificación de variantes genéticas y sirven de base para el desarrollo de estudios de asociación de genoma completo (GWAS). La reciente publicación de la tercera versión del genoma del almendro cv. 'Texas' (Phase 0 y Phase 1) (Castanera et al., 2024) ha permitido refinar la resolución del ensamblaje genómico, mejorando así la anotación de genes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la entrada en vigor de la Agenda 2030 que pretende la reducción del uso de agroquímicos, es crucial la búsqueda de alternativas que proporcionen equilibrio entre productividad y sostenibilidad. En lo que respecta al desarrollo de nuevas variedades, en el CITA, además de haber desarrollado la variedad Mardía<sup>®</sup>, resistente a mancha ocre, se están evaluando fuentes de resistencia a enfermedades fúngicas como son el cribado, causado por *Thyrostoma carpophilum*, y mancha ocre, causada por *Polystigma amygdalinum*, además de enfermedades relacionadas con chancros y seca de ramas causadas por *Neofusicoccum amygdali* y *Diaporthe amygdali*. Asimismo, se están identificando los marcadores del gen *RMia*, asociado a la resistencia de nematodos agalladores en almendro para la selección de múltiples genotipos híbridos, así como para la identificación de los genes *R* en el nuevo genoma del almendro. La implementación de estrategias -ómicas en el CITA ha permitido el desarrollo de metodología, para el estudio de grandes poblaciones de variedades locales, silvestres o de descendencia, lo que permitirá identificar fuentes de resistencia a estrés abióticos y enfermedades. El acceso a los genes de interés para la mejora del almendro ha permitido la puesta a punto de un protocolo de edición genética mediante CRISPR-Cas9 en raíces (Fig. 1 para su evaluación funcional (Jedličková, et al. 2024) desde el CITA. En esta línea, resultados recientes obtenidos en ensayos realizados en el CITA han revelado distintas preselecciones que presentan pocos o ausencia de síntomas asociados a *Armellaria mellea* y *Phytophthora* spp., lo que les otorga un gran potencial para su uso como portainjertos comerciales resistentes a estos hongos (Rubio-Cabetas et al., 2025).

Por otro lado, debido a la importancia ecológica de los microorganismos rizosféricos como biofortificadores de cultivos, así como agentes de control biológico (ACBs) frente a plagas y enfermedades (Sevillano-Caño et al., 2025), desde el CITA se evalúa el efecto de bacterias y hongos caracterizados como ACBs contra importantes enfermedades fúngicas causantes de chancros y seca de ramas producidas por *N. parvum* y *D. amygdali*, respectivamente, en preselecciones del programa de mejora del almendro del CITA.

## REFERENCIAS

- Bielsa, B., Bassett, C., Glenn, D.M., Rubio-Cabetas, M.J. 2018. Assessing field Prunus genotypes for drought responsive potential by carbon isotope discrimination and promoter analysis. *Agronomy*. 8, 42.
- Bielsa, B., Montesinos, Á., & Rubio-Cabetas, M. J. 2023. Pilowred®, new low-vigour-conferring rootstock resistant to nematodes. First results of its agronomical performance in six locations. VIII International Symposium on Almonds and Pistachios. 1406, 203-208.
- Castanera, R., de Tomás, C., Ruggieri, V., Vicient, C., Eduardo, I., Aranzana, M. J., Arús, P., & Casacuberta, J. M. 2024. A phased genome of the highly heterozygous 'Texas' almond uncovers patterns of allele-specific expression linked to heterozygous structural variants, *Horticulture Research*, 6, 2–10.
- Felipe, A.J. 2009. 'Felinem', 'Garnem', and 'Monegro' almond × peach hybrid rootstocks. *HortScience*. 44, 196–197.
- Felipe, A.J., Rius, X., Rubio-Cabetas, M.J. 2022. El Cultivo del Almendro. El Almendro II. ISBN: 0-646-85851-3, 568.
- Jedličková, V., Štefková, M., Sánchez-López, J.F., Grimplet, Jerome, Rubio-Cabetas, M.J. 2024. Genome editing in almond using hairy root transformation system. *Plant Cell Tiss Organ Cult*. 159, 74.
- Rubio-Cabetas, M.J., Bielsa, B., Córdoba, C., Balsells, M., Grimplet, J., González, V. 2025. Screening for genetic resistance in advanced selections of almond rootstocks for the recognition of genotypes resistant to fungal root pathologies. *Acta Horticulturae* (in press).
- Rubio-Cabetas, M.J., Espiau, M.T., Bielsa, B., 2024. 'Felama' Almond. *HortScience*. 59, 1033-1036.
- Sevillano-Caño, J., Agustí-Brisach, C., García-Mina, J. M., Zamarreño, Á. M., Barrón, V., & Sánchez-Rodríguez, A. R. 2025. *Fusarium oxysporum* FO12 enhances plant performance by modulating the phytohormone profile and soil properties as a function of the inoculation method. *Plant and Soil*, 1-22.
- Socias i Company y Felipe, A.J. 2007. Belona' and 'Soleta' Almond. *HortScience*. 42, (3) 704-706
- Socias i Company, R., Kodad, O., Alonso, J., Felipe, A.J. 2008. 'Mardía' Almond. *HortScience*. 43, 2240–2242.
- Socias i Company, R., Kodad, O., Ansón, J., Alonso, J. 2015. 'Vialfas' Almond. *HortScience*. 50, 1726–1728.

