

Descifrando al pistacho: genómica, desarrollo y fisiología

Estos avances suponen un hito en la investigación del pistacho y tienen aplicación práctica

Un reciente estudio internacional, liderado por la Universidad de Davis y con la participación del Iriaf, ha marcado un hito en la investigación del pistachero. En este trabajo han logrado descifrar con gran precisión el genoma de la variedad Kerman, la más cultivada a nivel mundial. Este mapa genético de alta calidad ha permitido estudiar en detalle qué genes intervienen en la formación y composición del fruto, lo cual permite entender cómo influyen en su sabor, valor nutricional y calidad.

Rosa Mérida-García¹, Adela Mena Morales², Raquel Martínez Peña¹, Pablo Carbonell-Bejerano³, Esaú Martínez¹, David Fariña Flores¹, Julián Guerrero¹.

¹ Centro Investigación Agroambiental "El Chaparrillo" (CIAG-IRIAF), Dpto. Cultivos Leñosos, Ciudad Real.

² Instituto Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario y Forestal de Castilla-La Mancha (Iriaf), Tomelloso, Ciudad Real.

³ Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino, ICVV (CSIC-CAR-UR), Logroño.



El pistachero (*Pistacia vera* L.), una especie dioica (las flores masculinas y femeninas se encuentran en individuos distintos), es originaria de Asia Central. En las últimas dos décadas ha experimentado un notable auge a nivel mundial, consolidándose como una alternativa estratégica en regiones áridas y semiáridas gracias a su tolerancia al calor, la sequía y suelos de baja calidad. Actualmente, este cultivo ocupa más de 750.000 ha a nivel global, con una producción superior al millón

de toneladas anuales (Faostat, 2024), siendo Estados Unidos, Irán y Turquía los principales productores. En Europa, España ha emergido con fuerza, concentrando su producción en Castilla-La Mancha, con unas 70.000 ha cultivadas (MAPA, 2024).

Uno de los principales retos del sector reside en la adaptación de variedades y portainjertos a las diferentes condiciones locales, especialmente en un contexto de cambio climático y restricciones hídricas crecientes. El calentamiento global podría

dificultar su cultivo, ya que el pistacho requiere una acumulación elevada de horas de frío durante el invierno para una correcta vernalización de las yemas florales y la posterior inducción de una floración sincrónica de los individuos en ambos sexos (Lee *et al.*, 2024).

En este sentido, el Centro de Investigación Agroambiental "El Chaparrillo" (CIAG-Iriaf) (Ciudad Real), desempeña un papel clave, habiendo desarrollado, por ejemplo, nuevas variedades macho de floración extra-tardía como Chaparri-

llo y Guerrero (Guerrero *et al.*, 2014), o habiendo provisto, la mayor parte de material vegetal empleado para injertos en España. Además, actualmente en el departamento de cultivos leñosos se llevan a cabo distintos proyectos a nivel nacional e internacional centrados en la mejora vegetal, agronómica, fitopatológica y el uso de nuevas tecnologías en el cultivo del pistacho.

Desde un punto de vista biológico, el pistachero es una especie diploide ($2n = 30$), es decir, cada individuo posee para cada uno de sus 15 cromosomas, y por tanto para cada gen, una copia heredada de la madre y otra del padre. El tamaño estimado de su genoma es de 600 Mb (Horjales *et al.*, 2003), equivalentes a 600 millones de letras del código genético. El genoma de pistachero se caracteriza por su alta heterocigosidad, debido al alto

grado de diferencia entre las copias que heredan de la madre y del padre. Este rasgo común en especies leñosas, explica porqué su propagación comercial se basa principalmente en la multiplicación vegetativa de las variedades mediante su injerto.

La ausencia de un genoma de referencia completo y de alta calidad ha representado uno de los principales retos en la mejora del pistacho. Comprender los mecanismos moleculares que influyen en el desarrollo y calidad del fruto puede impulsar la obtención de variedades mejoradas, con mayor valor nutricional, rendimiento y tolerancia a estreses ambientales (Kafkas *et al.*, 2023; Adaskaveg *et al.*, 2025). En esta línea, destaca la reciente participación del Iriaf en un estudio internacional liderado por la Universidad de Davis (EEUU) publicado en la revista

científica *New Phytologist*, que logró un nuevo ensamblaje genómico de alta calidad de la variedad Kerman, la más cultivada a nivel mundial. El estudio profundiza en los mecanismos moleculares que acontecen durante el desarrollo del fruto (Adaskaveg *et al.*, 2025).

En cuanto al desarrollo reproductivo, el pistachero presenta una inflorescencia en panícula con una apertura escalonada de las escamas florales, lo que genera asincronía en la receptividad de las flores y, por ende, diferencias temporales en el desarrollo de los frutos tanto dentro de una misma inflorescencia como entre ramas (Guerrero, 2011). Existe además una dominancia apical reproductiva que condiciona la disposición y viabilidad de los frutos, siendo las flores apicales las que poseen mayor probabilidad de producir frutos llenos (Crane, 1981).



18th Symposium

SANIDAD VEGETAL

Sevilla | 4, 5 y 6 de marzo 2026

Organiza:



Colegio Oficial de
Ingenieros Técnicos Agrícolas
y Graduados en Ingeniería
Agrícola de Andalucía Occidental

Patrocinan:



Colaboran:



El crecimiento del fruto sigue patrones específicos según el parámetro analizado. En términos de volumen, presenta un crecimiento inicial rápido (3-4 semanas), seguido por una larga fase de quiescencia (11-13 semanas) y un leve crecimiento final. El peso seco aumenta de forma lineal sin interrupciones, mientras que el peso fresco muestra una doble curva sigmoidea típica de las drupas carnosas, con una etapa intermedia de quiescencia. Esta doble curva ha sido ampliamente usada en estudios de riego deficitario controlado (Goldhamer y Beede, 2004; Gijón *et al.*, 2009), permitiendo dividir el desarrollo del fruto en tres etapas: I) crecimiento del fruto; II) endurecimiento del endocarpio con escaso crecimiento; y III) crecimiento de la semilla.

En este contexto, el trabajo de Adaskaveg *et al.* (2025) tuvo como objetivo principal caracterizar los mecanismos moleculares implicados en el desarrollo y composición del pistacho mediante la generación de un ensamblaje genómico de alta calidad para la variedad Kerman. Esta base de referencia permite profundizar en la comprensión de los procesos que determinan la calidad del fruto, su valor nutricional y su respuesta a condiciones de estrés. Los avances presentados en dicho trabajo no sólo suponen un hito en la investigación del pistacho, sino que también se traducen en aplicaciones prácticas directas para el sector productivo, el manejo agronómico y el mejoramiento genético.

Material y métodos

En este trabajo (Adaskaveg *et al.*, 2025) se evaluaron fisiológicamente árboles de pistacho de 30 años de la variedad hembra Kerman injertados en UCB1, durante tres campañas consecutivas (2019, 2020 y 2021) en el Centro de Investigación y Extensión Agrícola Kearney de la Universidad de California. Los datos obtenidos en 2019 fueron validados posteriormente



Disponer de esta reconstrucción del genoma del pistachero facilitará entender cómo responde la planta frente a distintos estreses ambientales. Gracias a esta base, será posible acelerar el desarrollo de variedades más productivas, resistentes y mejor adaptadas a nuevos retos climáticos.

en 2020 y 2021 en fincas comerciales con árboles de la misma variedad, pero de 10 años de edad. A lo largo de estas campañas se realizaron muestreos semanales en distintas etapas de desarrollo del fruto, recolectando racimos con frutos de madurez uniforme. Además, se registraron datos de temperatura ambiental para calcular los grados día de crecimiento (GDD), y se procesaron muestras congeladas de distintos tejidos del fruto (epicarpio, endocarpio y semilla), recolectadas en 2019.

A partir de estas muestras se extrajo ARN para analizar cambios en la actividad de los genes que pudieran explicar los procesos del desarrollo del fruto y las diferencias fisiológicas y de composición que se producen a lo largo del mismo. Para la extracción de ARN se usó 1 g de tejido molido por muestra y se evaluó su calidad e integridad mediante espectrofotometría y electroforesis en gel de agarosa. Luego se prepararon bibliotecas de ADN complementario (ADNc), se secuenció dicho ADN y se normalizaron los datos de expresión génica. Posteriormente,

se realizó un análisis de coexpresión génica para cada tipo de tejido de forma independiente. A través de agrupamiento jerárquico se identificaron módulos de genes, los cuales se correlacionaron con rasgos fisiológicos mediante el coeficiente de correlación de Pearson, permitiendo así identificar asociaciones funcionales relevantes.

Por otro lado, se analizaron los carbohidratos no estructurales (azúcares solubles y almidón) y se determinó el contenido de proteínas en el grano.

En cuanto al análisis metabólico, se determinó el perfil fenólico en tres fechas del año 2021, así como el perfil de ácidos grasos mediante cromatografía de gases. Finalmente se midieron las concentraciones de las hormonas ácido abscísico (ABA) y jasmónico (JA) en los 3 tejidos del fruto (epicarpio, endocarpio y semilla).

Se reconstruyó el mapa genético de la variedad Kerman para poder estudiar cambios en la actividad de los genes. Para ello, la secuenciación del genoma se realizó a partir del ADN que se extrajo de brotes tiernos de hojas. Estas muestras fueron recolectadas en la finca experimental "La Entresierra" (Iriaf-CIAG) (Ciudad Real). El ADN se extrajo a partir del aislamiento de núcleos utilizando el kit Nanobind Plant Nuclei Big DNA Kit (Circulomics). Para la identificación de genes en el mapa genético del ensamblaje del genoma también se extrajo ARN de Kerman (material recogido en La Entresierra (Iriaf-CIAG)). El ARN se extrajo con el kit Spectrum (Sigma) a partir de diferentes tejidos y estados fenológicos. Para la secuenciación del ADN y el estudio de la actividad de los genes, se usó la tecnología de última generación PacBio HiFi, que permite leer con gran precisión y con lecturas largas el material genético. A partir de estas lecturas se aplicaron análisis bioinformáticos para conocer todo el mapa genético de Kerman y todos los genes que se codifican en el mismo.

f @ X in

¡REGÍSTRATE
COMO
PROFESIONAL!



#AGROVID



agrovid

Valladolid

FERIA PARA EL CULTIVO DE LA VIÑA
27-29 | ENERO | 2026

www.agrovid.com



➔ EN SIMULTÁNEO CON SIEB | SALÓN IBÉRICO DE EQUIPAMIENTO PARA BODEGA

Resultados

A continuación, se exponen en distintos apartados los principales resultados de los ensayos realizados.

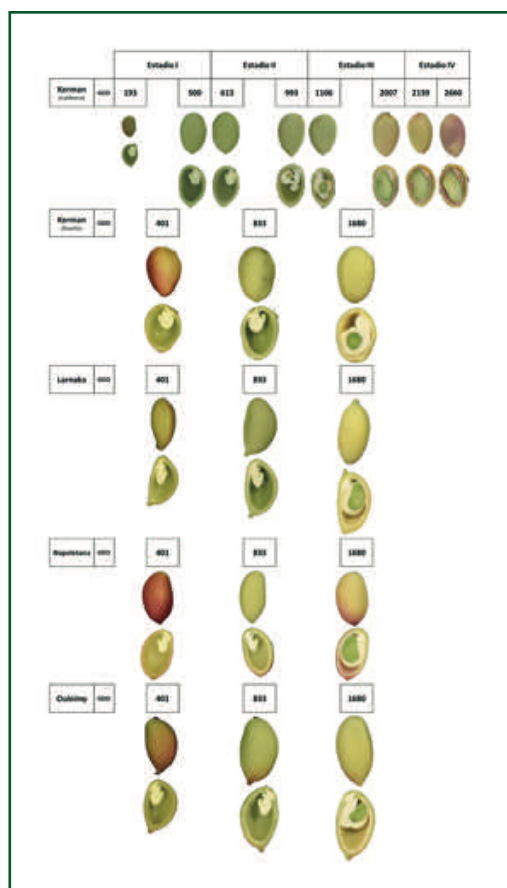
Etapas clave en el desarrollo del fruto

Una de las contribuciones más relevantes del estudio (Adaskaveg *et al.*, 2025) ha sido la identificación clara de cuatro etapas de desarrollo en el fruto, frente a la previa descripción de tres (Goldhamer & Beede, 2004) que teníamos hasta el momento. Para ello se han incluido los parámetros químicos para cada una de las etapas, lo cual ha sido clave para determinar la incorporación de una cuarta etapa. La acumulación de calor modula la fenología y las actividades enzimáticas que influyen en el metabolismo y el crecimiento del fruto. Así, el desarrollo de estas etapas se correlacionó con la temperatura acumulada en grados día ($GDD = [(T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}) / 2] - T_{\text{base}} (7^{\circ}\text{C})$).

Etapas I

La etapa I (**figura 1**) ocurre cuando los tejidos de la cáscara dura (endocarpio) y el “pellejo” (pericarpio + mesocarpio) crecen siguiendo un patrón de crecimiento logarítmico que se estabiliza a 500 GDD (Adaskaveg *et al.*, 2025) (la fecha corresponde de manera general con el mes de mayo y principios de junio en el interior peninsular Ibérico, encontrándose diferencias significativas entre cultivares). Durante este tiempo, los tejidos de la cáscara y pellejo se fusionan, y pasan de un color rojizo en los primeros estadios de desarrollo, a un color cada vez más verde, pudiendo presentar también algunas anotaciones de pigmentación rojiza, principalmente en los ápices del fruto dependiendo de la intensidad lumínica que incide sobre

FIG. 1 Etapas de desarrollo del pistacho en base a los grados día para la variedad Kerman en California (a) y para cuatro variedades, actualmente en estudio y seguimiento del desarrollo del fruto, en el CIAG-Iriaf (campaña 2025) (b).



el fruto (menos exposición a luz, mayor tonalidad verde). Al final de esta etapa se alcanza casi el volumen final del fruto, y alrededor del 20% del peso en seco. En esta etapa de desarrollo, las temperaturas mínimas del mes de mayo serán fundamentales para determinar su duración, factor que se ha correlacionado con la fecha de recolección (Guerrero, 2011). Así, una amplitud térmica diaria importante, principalmente debido a temperaturas mínimas bajas (inferiores a 4°C), puede provocar un desarrollo lento, e incluso

provocar malformaciones del fruto por pérdida de turgencia en el desarrollo de endocarpio (**figura 2a**).

Etapas II

La etapa II (**figura 1**) es el periodo de transición antes del comienzo del crecimiento del grano (embrión), y se sitúa entre los 500 y 1.000 GDD según Adaskaveg *et al.* (2025) (la fecha, de manera general corresponde al mes junio e inicios de julio en el centro Peninsular Ibérico). En esta etapa, el fruto ha alcanzado prácticamente su volumen final y el árbol comienza un periodo de parada o quiescencia, también vegetativa, de ahí la importancia del estrés hídrico y estado nutricional. Durante esta segunda etapa el crecimiento de la cáscara y el pellejo se detiene, pero los tejidos continúan acumulando peso seco. Distintos estudios de riego deficitario controlado, consideran esta etapa II como el estado fisiológico más tolerante al estrés hídrico moderado (Goldhamer y Beede, 2004), sin embargo, un estrés importante puede provocar una lenta recuperación de los árboles de pistacho durante la etapa III (Guerrero *et al.*, 2006; Gijón *et al.*, 2011), provocando un aumento de la abscisión de yemas florales.

Etapas III

La etapa III (**figura 1**) corresponde a la fase de crecimiento del grano, comenzando a los 1.000 GDD y alcanzando su tamaño máximo a los 2.000 GDD (Adaskaveg *et al.*, 2025). Esta etapa se caracteriza por una alta actividad metabólica, donde los granos mantienen un color verde profundo, hay un aumento de la biosíntesis de ácidos grasos insaturados y se mantiene una lignificación continua de la cáscara a lo largo de todo el periodo de crecimiento, incluida la etapa IV (Memmi, 2014). Todo ello

FIG. 2 (a) Daños causados por frío en el endocarpio durante el desarrollo de la etapa I del fruto; (b) Senescencia temprana de las hojas de brotes con fructificación a finales de las etapas II y III; (c) Color de maduración del pellejo en la variedad Larnaka; (d) Color de maduración del pellejo en la variedad Kerman; y (e) Color de maduración del pellejo en la variedad Napoletana.



conlleva a un aumento significativo del peso del fruto.

Los árboles inician el año con unas reservas que van consumiendo durante la formación del fruto (pellejo y cáscara), así como en el desarrollo vegetativo del año, sin embargo, en la etapa II las reservas se han agotado y el árbol necesita generar nuevos asimilados para el desarrollo del grano. En este punto, factores como el riego y el abonado aumentan su importancia, es decir, dicha etapa resulta clave para fotosintetizar las reservas para el crecimiento del grano. Así, una limitación de reservas en la etapa III provocará: i) mayor abscisión de yemas florales (alternancia de la producción), ii) un aumento del porcentaje de frutos vacíos (de origen no partenocárpico), iii) el crecimiento del grano actuará como principal sumidero de carbono, pudiendo reducir el potencial fotosintético estacional de las ramas al anticipar la senescencia foliar (Figura 2b), y iv) disminución del porcentaje de frutos abiertos y menor rendimiento del grano.

Etapa IV

La etapa IV (**figura 1**) marca el inicio de la madurez del grano, situada entre los 2.000 y 2.800 GDD (Adaskaveg *et al.*,

2025) (la fecha, de manera general corresponde al mes de septiembre e inicios de octubre, para variedades de maduración tardía, como cv. Kerman y cv. Kastel en el centro Peninsular Ibérico. Aquí el grano alcanza su tamaño máximo a pesar del continuo aumento en peso seco, el aumento en contenido de grasas y, un importante pico de terpenos (compuestos relacionados con el aroma, sabor y que presentan capacidad antioxidante) al inicio de esta etapa (1.881 GDD, Adaskaveg *et al.*, 2025). Asimismo, Adaskaveg *et al.* (2025) señalan que los compuestos fenólicos totales aumentaron durante esta cuarta etapa, respaldando así afirmaciones e informes previos respecto al pistacho y su importancia como fuente de antioxidantes (Ripari Garrido *et al.*, 2024). Cabe también destacar que el grano alcanza su máxima proporción de macronutrientes al comienzo de esta etapa IV, mientras que los cambios en los compuestos volátiles y fenólicos ocurren más tarde, aspecto a considerar para lograr el mejor sabor y contenido nutricional en la cosecha.

En esta etapa, los granos comienzan a perder su coloración verde oscuro, preparándose para la latencia de las semillas. Esto suele ser un factor determinante en

aquellas producciones destinadas al comercio del grano. Además, cabe destacar que el retraso de la recolección provoca la migración del color verde intenso a un color verde-amarillo.

La madurez del grano coincide con la maduración del pellejo. Principalmente se produce un ablandamiento del tejido (fácil separación del endocarpio), así como cambios en el color y tonalidad, siendo ésta más apagada. Cada cultivar (**figura 2c, 2d y 2e**) presenta unas tonalidades propias, un aspecto interesante para su análisis mediante imágenes espectrales, que ayudarían a la estimación de fechas más concretas de recolección, así como estimar la producción y calidad de la cosecha.

La dehiscencia de la cáscara dura, se produce durante esta última fase de desarrollo del fruto, siendo indispensable que este complete su maduración y el 100% de llenado para que se produzca la apertura del endocarpio. Cabe destacar que, las unidades de calor acumuladas durante el verano serán clave para la completa maduración y, a su vez, favorecerán el aumento del porcentaje de frutos abiertos (Guerrero, 2011).

En relación con los resultados presentados por Adaskaveg *et al.* (2025), actual-

mente en el CIAG estamos trabajando en un estudio de diferencias carpológicas entre cultivares. En la **figura 1b** pueden apreciarse las diferencias de desarrollo para 4 cultivares respecto al mismo valor de GDD (calculado desde el 1 de marzo).

Genética del fruto y calidad nutricional

Conocer los genes que se activan en cada etapa del desarrollo del fruto permite entender mejor cómo se forman cualidades fundamentales como el tamaño del grano, su contenido en grasa, el sabor, el color, e incluso sus propiedades antioxidantes.

En el estudio de Adaskaveg *et al.* (2025), se identificaron módulos de genes

que se activan en momentos específicos del desarrollo del pistacho en cada uno de los tejidos evaluados (mesocarpio, endocarpio y grano), por ejemplo:

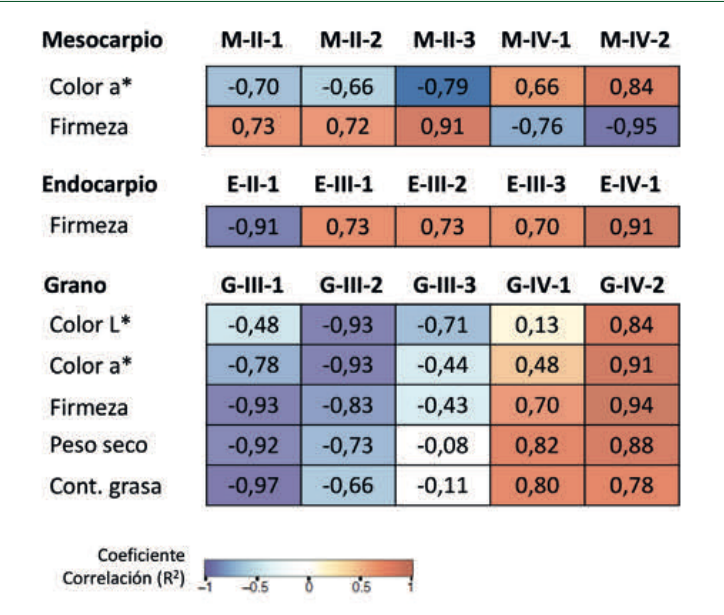
- Etapa III (crecimiento rápido del grano): se activan genes relacionados con el metabolismo de azúcares, proteínas y grasas. Esta etapa coincide con el aumento del contenido de almidón, proteínas y lípidos, lo que es esencial para la calidad del fruto.
- Etapa IV (maduración): se activa la producción de compuestos relacionados con el sabor (como los terpenos) y antioxidantes (como flavonoides y resveratrol). Esto explica por qué el pistacho madura con un sabor y valor nutricional tan particulares.

Otro de los hallazgos más importantes es la forma en la que el pistacho regula la producción de ácidos grasos saludables,

como el ácido oleico (monoinsaturado) y el ácido linoleico (poliinsaturado). A lo largo del desarrollo, el grano va acumulando más ácido oleico, lo que mejora el perfil graso y la calidad nutricional del fruto. También se identificaron genes clave que regulan esta acumulación, lo que abre la puerta a identificar y desarrollar variedades con perfiles de grasa más saludables y estables.

En cada uno de los tejidos evaluados se han identificado grupos de genes coexpresados, con alta expresión en determinados estados de desarrollo (I-IV) y que además están fuertemente correlacionados con la sucesión de cambios fisiológicos (**figura 3**). Estos resultados proporcionan una información que resulta clave, respecto a la relación entre distintos procesos moleculares y los cuatro estados de desarrollo del fruto descritos (Adaskaveg *et al.*, 2025).

FIG. 3 Modificada de Adaskaveg *et al.* (2025). Coeficiente de correlación de Pearson entre los perfiles de expresión de los módulos seleccionados y los datos fisiológicos para cada tejido. M: mesocarpio, E: endocarpio, G: grano. El estadio de desarrollo para cada módulo (valor numérico de los encabezados) se indica como I, II, III o IV.



Del genoma al pan-genoma

Gracias a tecnologías de secuenciación avanzadas, en el citado trabajo se ha logrado construir el mapa genético más completo y preciso hasta la fecha de una de las variedades más cultivadas de pistacho, Kerman, lo que representa un gran avance en la comprensión de aspectos como por ejemplo el desarrollo del fruto. Además, la disponibilidad de este mapa genético del pistachero sienta las bases para futuros avances en su cultivo y programas de mejora, como por ejemplo a través del desarrollo de herramientas moleculares como la mejora asistida por marcadores. Este nuevo ensamblaje, en 15

cromosomas bien definidos, ha permitido describir aspectos de la arquitectura genómica previamente desconocidos. Entre estos aspectos, Adaskaveg *et al.* (2025) han detectado regiones repetitivas significativamente grandes y estructuralmente complejas, en forma de ‘nudos’, en 11 de los 15 cromosomas, indicando zonas de alta variabilidad, las cuales podrían tener un papel realmente significativo en el desarrollo del pistacho y su adaptación al ambiente.

Además, el ensamblaje del genoma de Kerman ha servido de base para producir los ensamblajes de los genomas de otros cinco cultivares genéticamente diversos, avanzando así hacia la construcción del pan-genoma del pistacho, que recoge la variabilidad completa de la especie (Lee *et al.*, 2024). En este caso con el fin de identificar genotipos que puedan asegurar la producción de pistacho en condicio-

nes cambiantes como las originadas por el cambio climático, a partir del germoplasma disponible en la finca La Entresierra (Iriaf-CIAG) se seleccionaron genotipos femeninos y masculinos de floración temprana (Mateur y T41, respectivamente), femeninos de floración tardía (Sirora, y Napoletana), y un genotipo masculino de floración extra-tardía (Chaparrillo). Los resultados obtenidos muestran genomas de alta calidad también para estos cinco cultivares, y la comparación de las dos copias genómicas o haplotipos ensamblados en cada cultivar identifica una alta heterocigosidad y diversidad inter-varietal. Esta diversidad incluye variación genética asociada a los fenotipos seleccionados, pudiendo ser responsable de los mismos. Además, gracias a datos transcriptómicos obtenidos, se han anotado entre 37.500 y 41.500 genes por cultivar en sus respectivos ensamblajes de genoma, lo que revela una notable variación en la presencia o ausencia de genes entre ellos. Este tipo de variabilidad, junto con las diferencias estructurales detectadas entre los cromosomas de los distintos cultivares, es clave para identificar rasgos agronómicos relevantes.

Regulación hormonal y genes clave

Las hormonas vegetales como el ácido abscísico (ABA) y el ácido jasmónico (JA) también juegan un papel importante en el desarrollo del fruto del pistacho. En Adaskaveg *et al.* (2025) identificaron que el ABA se acumula principalmente en el grano durante la transición a la madurez, ayudando a preparar la semilla para el estado de reposo. Por otro lado, identificaron que el JA está más presente en las cáscaras, participando probablemente en procesos de defensa y maduración. Se han detectado módulos génicos que revelan rutas implicadas en la calidad nutricional del grano durante los estados III y IV del desarrollo del mismo (Adaskaveg *et al.*, 2025). El módulo G-III-1 resultó

altamente correlacionado con el color y el rápido crecimiento durante el estado III y se encontró un enriquecimiento en las funciones implicadas en procesos como la fotosíntesis, metabolismo de carbohidratos y la acumulación de proteínas. Asimismo, se han identificado genes que actúan como “interruptores maestros” en el control de rutas completas de producción de grasas, destacando los denominados *LEC1* y *WRI1*, presentes en muchas especies agrícolas. Estos genes ayudan en la coordinación del momento de inicio de producción de aceite en la semilla, así como en la cantidad del mismo, un aspecto crucial en la mejora del rendimiento y calidad del grano.

Conclusión

El trabajo de Adaskaveg *et al.* (2025) marca un antes y un después en el conocimiento del pistachero. La obtención de un ensamblaje genómico de referencia para el pistachero no solo proporciona un mapa detallado de su ADN, sino que abre la puerta a comprender mejor cómo se forman sus frutos, qué genes intervienen en su calidad y cómo responden de la planta ante condiciones adversas. Asimismo, utilizando este genoma como referencia, se han podido ensamblar y anclar cinco genotipos adicionales en 15 cromosomas, avanzando hacia la construcción de un pan-genoma que refleje la variabilidad genética del pistacho (Lee *et al.*, 2024). Esta información, que hasta ahora era fragmentaria, servirá como base para acelerar la obtención de nuevas variedades más productivas, nutritivas y resistentes, repercutiendo directamente en la sostenibilidad y competitividad del cultivo. Podemos concluir que este avance sitúa al pistachero en la era de la genómica aplicada, aumentando las posibilidades de investigaciones con beneficios potenciales para agricultores y consumidores. ■

REFERENCIAS

- Adaskaveg, J. A., Lee, C., Wei, Y., Wang, F., Grilo, F. S., Mesquida-Pesci, S. D., Davis, M., Wang, S. C., Marino, G., Ferguson, L., Brown, P. J., Drakakaki, G., Mena Morales, A., Marchese, A., Giovino, A., Martínez Burgos, E., Paolo Marra, F., Marchante Cuevas, L., Cattivelli, L., Bagnaresi, P., Carbonell-Bejerano, P., Monroe, J. G., & Blanco-Ulate, B. (2025). In a nutshell: Pistachio genome and kernel development. *New Phytologist*, 246(3), 1032–1048. <https://doi.org/10.1111/nph.70060>
- Crane, J. C., & Iwakiri, B. T. (1981). Morphology and reproduction of pistachio. *Horticultural Reviews*, 3, 376–393.
- FAOSTAT. (2024). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.faostat.fao.org>
- Gijón, M. C., Guerrero, J., Couceiro, J. F., Moriana, A. (2009) Deficit irrigation without reducing yield or nut splitting in pistachio (*Pistacia vera* cv Kerman on *Pistacia terebinthus* L.). *Agricultural Water Management*, 96, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.004>.
- Gijón, M. C., Giménez, C., Pérez-López, D., Guerrero, J., Couceiro, J. F., & Moriana, A. (2011). Water relation of pistachio (*Pistacia vera* L.) as affected by phenological stage and water regimes. *Scientia Horticulturae*, 128(4), 415–422. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.02.004>
- Goldhamer, D., & Beede, R. (2004). Regulated deficit irrigation effects on yield, nut quality and water-use efficiency of mature pistachio trees. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 79(4), 538–545. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.1511813>
- Guerrero, J., Memmi, H., Pérez-López, D., Couceiro, J. F., Moriana, A., Martínez, E., & Gijón, M. C. (2014). Phenological behavior of two new male cultivars of pistachio (*Pistacia vera* L.): ‘Chaparrillo’ and ‘Guerrero’. *Acta Horticulturae*, 1028, 297–303. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1028.48>
- Guerrero, J. (2011). Comportamiento varietal del pistachero (*Pistacia vera* L.) y respuesta agronómica del portainjerto autóctono *Pistacia terebinthus* L. en Castilla-La Mancha (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Guerrero, J., Moriana, A., Pérez-López, D., Couceiro, J. F., Olmedilla, N., & Gijón, M. C. (2006). Regulated deficit irrigation and the recovery of water relations in pistachio trees. *Tree Physiology*, 26(1), 87–92. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.1.87>
- Horjales, M., Redondo, N., Blanco, A., & Rodríguez, M. A. (2003). Cantidades de DNA nuclear en árboles y arbustos. *Nova Acta Científica Compostelana. Biología* (España).
- Kafkas, S., Ma, X., Zhang, X., Topçu, H., Navajas-Pérez, R., Wai, C. M., Tang, H., Xu, X., Khodaeiaminjan, M., Güney, M., Paizila, A., Karci, H., Lin, J., Lin, H., Herrán, R., Rejón, C. R., García-Zea, J. A., Robles, F., ... Ming, R. (2023). Pistachio genomes provide insights into nut tree domestication and ZW sex chromosome evolution. *Plant Communications*, 4(3), 100497. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100497>
- Lee, C., Mena-Morales, A., Marchese, A., Giovino, A., Trippa, D., Martínez, E., Marra, F. P., Cuevas, L. M., Cattivelli, L., Bagnaresi, P., Carbonell-Bejerano, P., Monroe, G. J. (2024). Recent progress on genome assemblies and annotation of six pistachio cultivars. *Acta Hort.* 1406. ISHS 2024. Proc. VIII International Symposium on Almonds and Pistachios. DOI 10.17660/ActaHortic.2024.1406.13
- MAPA. (2024). Superficies y producciones anuales de cultivos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/>
- Memmi, H., Gijón, M. C., Guerrero, J., Couceiro, J. F., & Pérez-López, D. (2014). Characterization of pistachio fruit growth stages as a base for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 1028, 381–384. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1028.62
- Ripari Garrido, J., Patrignani, M., Puppo, M. C., & Salinas, M. V. (2024). Nutritional and bioactive characterization of pistachio—A review with special focus on health. *Exploration of Foods and Foodomics*, 2(4), 363–390. <https://doi.org/10.10374/eff.2024.00042>

BIBLIOGRAFÍA

Existe una amplia relación bibliográfica a disposición de los lectores en el correo electrónico redaccion@eumedias.es.