

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

VARIEDADES DE OLIVO TRADICIONALES EN EL ALTO ARAGÓN: CARACTERIZACIÓN MOLECULAR, ACEITES MONOVARIETALES Y ÁRBOLES MONUMENTALES

Javier Viñuales Andreu¹ | Alfredo Serreta Oliván¹ |
Rubén Sancho Cohen^{1,2} | Ana Cristina Sánchez Gimeno³ |
Pablo Martín-Ramos⁴ | José Antonio Cuchí Oterino¹ |
José Casanova Gascón¹

RESUMEN La recuperación de variedades minoritarias de olivo ayuda a preservar la diversidad genética y contribuye a introducir prácticas agrícolas sostenibles. El Consejo Oleícola Internacional ha reconocido la importancia de conservar los recursos genéticos del olivo y el programa Horizonte Europa de la UE ha identificado la preservación de la diversidad de cultivos como una prioridad para los sistemas alimentarios sostenibles. En el trabajo origen de este artículo se promovieron, muestrearon y analizaron olivares

¹ Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. jvinuales63@gmail.com, serreta@unizar.es, rsancho@unizar.es, cuchi@unizar.es, jcasan@unizar.es

² Grupo de Bioquímica, Biofísica y Biología Computacional. Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos. Universidad de Zaragoza. C/ Mariano Esquillor Gómez. Edificio I+D. E-50018 Zaragoza.

³ Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos. Facultad de Veterinaria. Instituto Agroalimentario de Aragón – IA2 (CITA – Universidad de Zaragoza). C/ Miguel Servet, 177. E-50013 Zaragoza. anacris@unizar.es

⁴ Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrícolas. Universidad de Valladolid. Avenida de Madrid, 44. E-34004 Palencia. pmr@uva.es

viejos de la provincia de Huesca, gestionados agronómicamente según el modelo tradicional y sometidos a estudio mediante técnicas de caracterización molecular (basadas en marcadores EST-SNP). Un total de 29 nuevas variedades fueron identificadas y depositadas en el Banco Mundial de Germoplasma del Olivo del IFAPA. En el primer paso hacia su valorización, se elaboraron y se caracterizaron 8 aceites monovarietales de las variedades del Alto Aragón, y se evaluaron sus propiedades organolépticas, allanando el camino para la elaboración de aceites de calidad diferenciada. Además, se seleccionaron olivos centenarios y se escanearon en 3D para promover su protección como árboles singulares o monumentales y con fines oleoturísticos. Los hallazgos reportados ponen de manifiesto el rico patrimonio olivarero de la frontera más septentrional del cultivo del olivo en España.

PALABRAS CLAVE EST-SNP. Recursos genéticos. LiDAR. Árboles monumentales. *Olea europaea*. Aceite de oliva. Alto Aragón.

ABSTRACT The recovery of minority olive varieties helps to preserve genetic diversity and contributes to sustainable agricultural practices. The International Olive Council has recognised the importance of conserving olive genetic resources and the EU's Horizon Europe programme has identified the preservation of crop diversity as a priority for sustainable food systems. In the article presented here, old olive groves in the province of Huesca, managed according to the traditional model, were sampled and analysed using molecular characterisation techniques (based on EST-SNPs markers). 29 new varieties were identified and deposited in the IFAPA's World Olive Germplasm Bank. In the first step towards their valorisation, 8 monovarietal oils of the Alto Aragón varieties were produced and characterised, and their organoleptic properties were evaluated, paving the way for the production of oils of differentiated quality. In addition, centennial olive trees were selected and 3D scanned to promote their protection as singular or monumental trees and for oleotourism purposes. The findings highlight the rich olive heritage of this northernmost frontier of olive cultivation in Spain.

KEYWORDS EST-SNP. Genetic resources. LiDAR. Monumental trees. *Olea europaea*. Olive oil. Alto Aragón (Spain).

INTRODUCCIÓN

Aunque actualmente se considera un cultivo secundario, el del olivo está muy arraigado en el territorio del Alto Aragón, ya que forma parte de la cultura culinaria y de la tradición agronómica en muchas localidades. El cultivo del olivo se documenta en la región desde la Antigüedad tras su desarrollo desde la costa mediterránea, expansión debida a griegos y romanos.

Las variedades cultivadas fueron cambiando con el tiempo al adaptarse al territorio, accidentado y diverso, aunque la literatura clásica menciona más el aceite que las variedades. Las referencias a su calidad han sido numerosas desde la Edad Media, ya que Aragón fue un importante productor de aceite desde el siglo xv (Colás Latorre, 2015). Durante el Siglo de las Luces varios libros aluden a la importancia del olivo en esta región. El economista y naturalista Ignacio Jordán de Asso (1798) viajó por todo Aragón y enumeró las localidades que producían buen aceite, evaluando su producción. Este autor comentaba los intercambios varietales entre Sevilla y Aragón, la existencia de plantaciones en los Pirineos y las bondades de cultivar Empeltre sin olvidar otras variedades aragonesas como Royal, Negral, Racimillo, Acebuche, Picudillo, Manzanillo, Verdillo y Cirujal. Durante el siglo xix se hizo importante el estudio de las variedades en España (Barranco Navero, Fernández Escobar y Romero, 2017) y se empezaron a localizar las de Aragón. Megino y Metauten (1804) menciona que en el reino de Aragón se cultivaban más variedades que en el sur de España, y nombran Royal, Negral, Sevillano, Racimillo o Uba, Acebuche, Picudo, Manzanillo, Verdillo, Cirujal o Largal y Empeltre o Zuequecilla. En 1818 el militar, naturalista e ingeniero Félix de Azara describió variedades del somontano como Manzanilla (Alquecerana), Cerecera (Royeta), Negral (Neral), Panseña (Panseñera), Mochuta (Mochuto), Grosal, Olivonera, Verdeña, Minutesa y Rebordeca (Baulny, 1968). Priego Jaramillo (1930) describió muchas de las variedades locales de la provincia de Huesca, con un sistema de identificación morfológica básica y breves comentarios agronómicos.

Sin embargo, desde 1950 la despoblación, la mecanización intensiva de los cereales y el arranque del olivo (Ortega Nieto, 1958) han reducido las hectáreas cultivadas en Aragón a solo el 0,6 % de la superficie en cultivo en la actualidad (Escudero Población y cols., 2019). Además, el cultivo del olivo ha experimentado importantes cambios en los últimos años: por un lado, se ha desplazado de las regiones productoras tradicionales a otras zonas donde no se cultivaba (como las nuevas zonas de regadío en el sur del Alto Aragón), y por otro, se ha reducido el número de variedades plantadas. Esta reducción en el número de variedades cultivadas se debe al hecho de que el cultivo intensivo del olivo requiere variedades mejor adaptadas, lo que conduce a la pérdida de recursos genéticos (Rallo Romero, 2005). Sin embargo, la recuperación de variedades minoritarias de olivo es importante porque

ayuda a preservar la diversidad genética y contribuye a prácticas agrícolas sostenibles. También recupera el paisaje y las zonas marginales de cultivo, y optimiza la huella ecológica o biocapacidad (López Bermúdez y cols., 2004). En consecuencia, el Consejo Oleícola Internacional (COI) ha reconocido la importancia de conservar los recursos genéticos del olivo y ha establecido el Banco Mundial de Germoplasma del Olivo de Córdoba (BGMO – UCO) para recolectar y preservar diversas variedades. Del mismo modo, el programa Horizonte Europa de la Unión Europea ha identificado la preservación de la diversidad de cultivos como una prioridad para los sistemas alimentarios sostenibles. Además, la recuperación varietal cumple con los objetivos del Comité de Agricultura de la FAO sobre sistemas alimentarios sostenibles e integración de la biodiversidad en los sistemas agrícolas (FAO, 2020), y está orientada hacia los objetivos 2030 (FAO, 2018), contribuyendo al logro de 11 de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (a saber, los n.ºs 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 15 y 16).

La utilización continuada de un número reducido de variedades muy productivas ha supuesto la desaparición progresiva de las tradicionales y locales, algunas de las cuales, aunque menos productivas, poseen gran valor tanto agronómico, como fuente de diversidad genética de la especie, como comercial, por las particularidades de los aceites que de ellas se pueden obtener.

La diversidad genética que albergan las variedades tradicionales de olivo ha sido ampliamente estudiada, especialmente en la cuenca mediterránea, mediante diversas técnicas de genotipado y marcadores moleculares. Trujillo y cols. (2013), El Bakkali y cols. (2019) y Gómez Rodríguez y cols. (2020) analizaron secuencias cortas y repetidas de ADN, denominadas *microsatélites* (SSR – Simple Sequence Repeat), y rasgos morfológicos para caracterizar los olivos registrados en los bancos de germoplasma de Marrakech y Córdoba. Otra técnica, el genotipado por secuenciación (GBS – Genotyping by Sequencing), ha sido utilizada por D’Agostino y cols. (2018) en el estudio de una colección de 94 cultivares representativos del germoplasma del olivo italiano. Una de las técnicas de genotipado más utilizadas en los estudios de diversidad genética en olivo es la centrada en analizar un conjunto de mutaciones o polimorfismos puntuales, de un solo nucleótido (SNP – Single Nucleotide Polymorphisms), distribuidos a lo largo del genoma (Biton y cols., 2015). Cuando estas mutaciones puntuales se encuentran

en regiones codificantes del genoma, es decir, genes, se las denomina EST-SNP (Expressed Sequence Tag – Single Nucleotide Polymorphism). Este tipo de marcadores moleculares se han utilizado para explorar la diversidad genética en colecciones de olivos tanto cultivados (Belaj y cols., 2018 y 2022; Kaya y cols., 2013) como silvestres (Mariotti y cols., 2020). En el presente artículo se ha llevado a cabo la caracterización genotípica de 92 especímenes de olivos del Alto Aragón mediante la utilización de un panel de 96 EST-SNP desarrollados y validados previamente por Belaj y cols. (2018 y 2022) y Gómez Gálvez y cols. (2024), en colaboración con el BGMO.

En el caso particular de Aragón, la mayoría de los estudios de caracterización y recuperación de variedades tradicionales se han desarrollado en los últimos veinte años (Mallor y cols., 2014). Muchos de los estudios agronómicos se han centrado en las 2 variedades más importantes: Empeltre y Arbequina (Gracia y cols., 2023; Elguea Blanco y cols., 2006; Font i Forcada y cols., 2014; Romero Aroca y cols., 1993). Por el contrario, las variedades locales o minoritarias recuperadas apenas han sido estudiadas (Benito y cols., 2010; Puyuelo Arilla, 2009). Sin embargo, se reconoce que estas variedades locales son una valiosa fuente de diversidad para el mejoramiento, dado que generalmente crecen en condiciones agroclimáticas difíciles (Pascual Guillén, 1988).

En la provincia de Zaragoza existe un proyecto de recuperación varietal (Benito y cols., 2010) dentro de un programa de desarrollo rural de la Denominación de Origen Aceite Sierra del Moncayo. En la provincia de Teruel se han llevado a cabo varios estudios sobre las variedades cultivadas en el Bajo Aragón, entre ellos el estudio morfológico del hueso de 8 variedades por parte de Pascual Guillén (1988), y actualmente el proyecto *Oliveras centenarias y singulares del Matarraña*, que tiene como antecedente un estudio previo (Zorrilla Alcaine, 1996). Por otro lado, la provincia de Huesca ha recibido poca atención. La zona más estudiada es el somontano de Barbastro, donde la Verdeña es la variedad principal, seguida de Empeltre, Blancal, Negral y Arbequina. Viñuales (2007) recuperó 18 variedades repartidas por toda la región, lo que sirvió de base para estudios posteriores sobre las mismas. Las variedades recuperadas han sido plantadas en diferentes puntos del territorio, como el Parque Olearum en Barbastro o el Bosque de los Olivos de Buera, así como en parcelas experimentales en

varias localidades de la provincia. En la comarca de la Hoya de Huesca Viñuales y González (2008) localizaron diversas variedades, que fueron descritas y caracterizadas. En los años siguientes se prospectaron otras zonas de la provincia y se localizaron 10 nuevas variedades (Casanova y cols., 2013). Un total de 32 de estas variedades fueron replantadas en el Banco de Germoplasma de la Escuela Politécnica Superior de Huesca (Universidad de Zaragoza). Las características de los aceites obtenidos de algunas de estas variedades han sido analizadas por Espada Carbó y cols. (2009) y, más recientemente, por Serreta Oliván y cols. (2023).

A partir de los esfuerzos iniciales, este estudio tuvo un doble objetivo: por un lado, identificar y caracterizar las variedades minoritarias de olivo en el Alto Aragón, especialmente en las comarcas de Sobrarbe y Ribagorza, y por otro, proponer posibles estrategias para la valorización de este patrimonio olivarero. Para lograr el primer objetivo, se realizaron encuestas exhaustivas en antiguas plantaciones y terrazas abandonadas, con el apoyo de asociaciones y agricultores. Se seleccionaron y caracterizaron genéticamente 96 especímenes. El segundo consistió en la elaboración y la caracterización de aceites de oliva monovarietales a partir de variedades seleccionadas, junto con la identificación y la caracterización de un subconjunto de olivos centenarios con valor potencial como árboles monumentales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Entorno geográfico

El Alto Aragón, en la parte central al sur de los Pirineos, es un territorio complejo. La zona más septentrional es muy accidentada y alcanza una altitud de más de 3000 metros, mientras que la mitad sur es mucho más llana, con una altitud media de 400 metros. La precipitación media anual oscila entre más de 1000 milímetros en el extremo norte y 300 milímetros en el sur. En consecuencia, en este territorio existe un amplio mosaico de ecosistemas.

Prospección de variedades locales de olivo en antiguas plantaciones

Inicialmente se realizaron prospecciones en todo el Alto Aragón. Se pidió a los agricultores información mediante un formulario que debían rellenar sobre las variedades comunes en su zona de cultivo, así como sobre aquellas

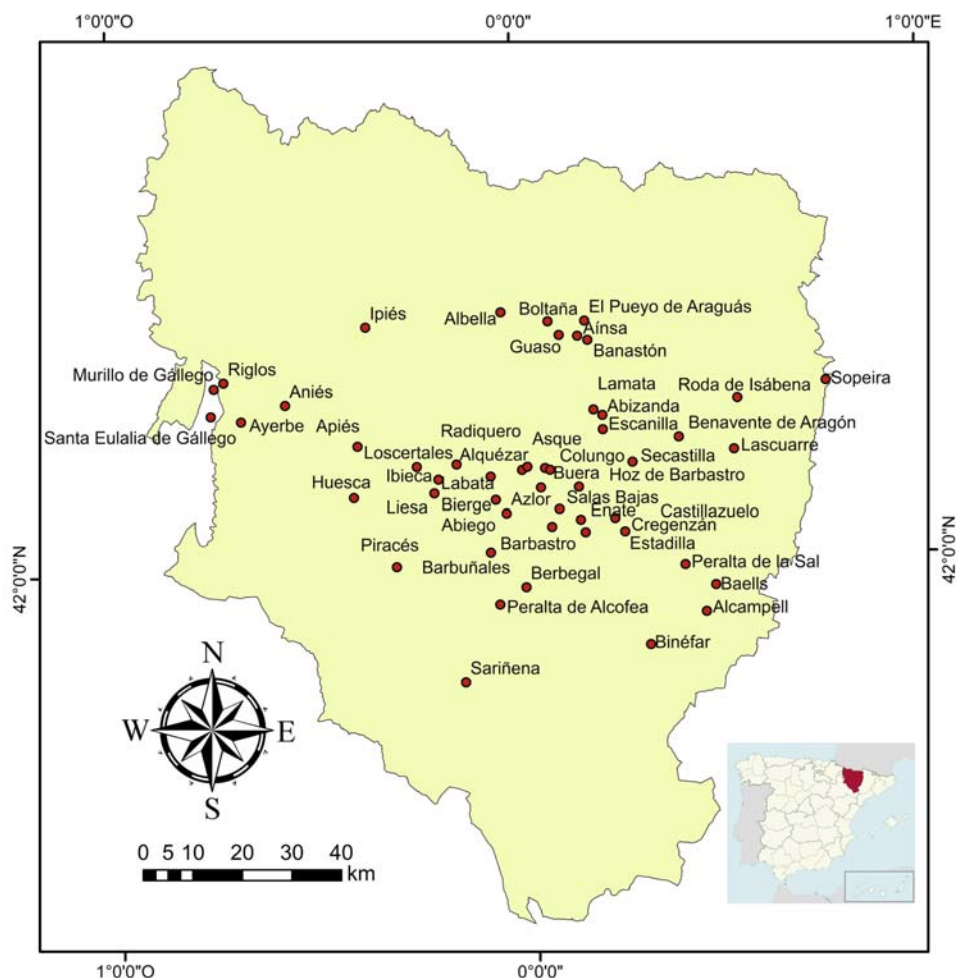


Fig. 1. Mapa de las localidades visitadas y en las que se han muestreado o marcado olivos.

minoritarias y locales. Los formularios de recogida de datos se cumplieron *in situ*, de conformidad con las directrices establecidas por las organizaciones internacionales de caracterización, concretamente el COI y la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV).

Los resultados de la encuesta y la información recopilada se resumen en la figura 1, que muestra las localidades de origen del material vegetal estudiado, y en la tabla III, que presenta el material hallado en cada localidad,

con el nombre tradicional proporcionado por los agricultores. En algunas visitas no se realizó muestreo, ya que las variedades encontradas eran comerciales, modernas, o bien eran locales conocidas. En total, fueron marcados árboles de 51 localidades y se seleccionaron 128 olivos para su posterior estudio. Se tomaron muestras de algunas variedades plantadas en varias localidades para comprobar su difusión por toda la provincia de Huesca.

Caracterización molecular

En el presente artículo se han genotipado un total de 92 olivos pertenecientes a 56 variedades / cultivares procedentes de 39 localidades del Alto Aragón y una de Salamanca. Para ello se extrajo el ADN de hojas frescas (Rosa y cols., 2002) y se analizó un panel de 96 *loci* EST-SNP (Belaj y cols., 2022). Se utilizaron dos cultivares de referencia (Picual y Frantoio) como controles positivos. Las muestras Royal de Calatayud_6 de Lamata y Royeta de Asque_4 de Radiquero fueron eliminadas de los análisis posteriores por tener al menos cuatro datos que faltaban (*no call*) del total de 96 EST-SNP. Se utilizó el *software* GenAIex 6.503 (Peakall y Smouse, 2006 y 2012) para llevar a cabo el análisis de emparejamiento multilocus por pares (*pairwise multi-locus matching analysis*), usando el formato codominante, para detectar genotipos redundantes. Posteriormente se utilizó el conjunto de datos no redundantes, manteniendo un único genotipo representativo, para calcular la distancia genética usada en el cálculo de los siguientes parámetros genéticos: número medio de alelos observados (N_a), número de alelos efectivos (N_e), índice de información de Shannon (I), heterocigosidad observada (H_o), heterocigosidad esperada (H_e) y frecuencia alélica mínima (MAF; alelo menos común en una población). El contenido de información polimórfica (PIC) se calculó mediante el *software* MolMarker v.1.0 (Jahnke y cols., 2022).

Se realizó un análisis de coordenadas principales (PCoA), basado en la matriz de distancia genética de 58 genotipos no redundantes, para dilucidar las relaciones genéticas entre las variedades de olivo. La distancia genética y el gráfico PCoA se calcularon y trazaron utilizando el protocolo *PCoA mediante matriz de covarianza con normalización de datos* disponible en GenAIEx. Además, el panel de 96 EST-SNP de los 58 genotipos no redundantes se utilizó para llevar a cabo la estimación de la estructura genética

poblacional mediante el análisis de mezclas (*admixture analysis*) con factorización de matrices no negativas dispersas implementada en el paquete LEA (Frichot y François, 2015; Gain y François, 2021) de R. Para delimitar el número de agrupaciones (K , *clusters*) que probar, se realizó un análisis de mezcla preliminar fijando solo 10 repeticiones y probando K s de 1 a 58, el número total de genotipos no redundantes. Según el criterio de entropía, se analizaron en detalle los K s de 1 a 8 para calcular el número de poblaciones ancestrales que mejor explicaban los datos genotípicos. Para ello se repitió el análisis en el rango de grupos desde 1 hasta 8 (100 repeticiones). El grupo con menor entropía era el que mejor explicaba los datos genotípicos. La matriz Q (*Q-matrix*) del mejor grupo (K) se utilizó para mostrar mediante un diagrama de barras las proporciones de ancestralidad utilizando el paquete *pophelper* y la aplicación interactiva *pophelperShiny* (Francis, 2017) de R.

Preparación y caracterización de aceites monovarietales

Alineado con el enfoque propuesto por García Vico y cols. (2009), la preservación del patrimonio del aceite de oliva se persigue con eficacia a través de la valorización de aceites distintivos, facilitando el desarrollo de circuitos comerciales localizados. Por ello, en esta investigación elaboramos aceites monovarietales a partir de 8 variedades específicas originarias del Alto Aragón. Esta selección comprendió 4 variedades previamente reconocidas (Alía, Blancal, Gordera de Abizanda y Mochuto) y 4 recién identificadas (Minutera de Labata, Minutera de Viña, Olivonero de Ayerbe y Rosal). La cosecha, realizada en noviembre de 2022 en el arboreto de la Universidad de Zaragoza en Huesca, consistió en la recogida de 2-3 kilogramos de cada variedad. Las muestras se llevaron a la Planta Piloto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Facultad de Veterinaria, donde se efectuaron las medidas básicas de calidad de la aceituna.

Para la determinación del índice de madurez, se tomaron 100 frutos y se evaluó la pigmentación del epicarpio y del mesocarpio de las aceitunas mediante una escala basada en siete niveles, usando la fórmula proporcionada en Rallo Romero (2005). En cuanto a la extracción del aceite y el cálculo del rendimiento graso, el aceite se obtuvo utilizando un equipo Abencor (MC2, Sevilla) compuesto por un molino, un mezclador térmico y una

centrífuga, simulando el proceso industrial. Las aceitunas se trituraron con un molino de martillos. La pasta resultante se batió en una termobatidora a 26 °C durante 30 minutos y luego se vertió en la centrífuga vertical tipo canasta, que gira a 3500 revoluciones por minuto y que operó durante 1 minuto. Tras repetir la centrifugación, la pasta se recogió a través del orificio inferior en un cilindro graduado. Después de reposar durante al menos 30 minutos, se leyó el volumen de aceite y se calculó el rendimiento. Los análisis fisicoquímicos de los aceites se externalizaron al Laboratorio Agroambiental del Gobierno de Aragón en Zaragoza, donde se determinaron la acidez, el índice de peróxidos, los coeficientes de extinción ultravioleta, los fenoles totales, los esteroides, el perfil de ácidos grasos y la estabilidad a la oxidación.

En cuanto al análisis sensorial, dado que solo se disponía de pequeños volúmenes de aceite, fue realizado por un experto perteneciente al Panel de Cata de Aceite de Oliva de Aragón. Se utilizaron copas estándar de cata azul, ya que no se evalúa el color. Se colocaron entre 14 y 16 mililitros de aceite en los vasos y se cubrieron con un cristal de reloj. La muestra se calentó a 28 °C. Los atributos positivos (afrutado, amargo y picante) y negativos (rancio, avinagrado...) se evaluaron en una escala de 0 a 10, según el COI (2018).

Elaboración de un primer censo de árboles singulares

Como sugiere Lafuente Benaches (2007), la preservación del patrimonio del aceite de oliva se extiende a la puesta en valor de los olivos centenarios, reconociéndolos como árboles monumentales, componentes integrantes del patrimonio biocultural. Estos árboles contribuyen significativamente a la interpretación de la estratificación del paisaje histórico y tienen un valor excepcional en la preservación de la memoria histórica de las comunidades donde se encuentran.

El método de medición para definir un árbol monumental se describe, para Cataluña, en la Ley 6/2020 (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2020), que establece que la catalogación de olivos monumentales es a partir de 350 centímetros de perímetro, medidos a una altura de 130 centímetros desde el suelo. Los árboles monumentales, de acuerdo con estos criterios,

se localizaron en varias poblaciones. En este primer censo se seleccionaron individuos de las localidades de Guaso, Pueyo de Araguás, Riglos y Santa Eulalia de Gállego. Para su catalogación, se optó por la técnica de detección y medición de la luz (LiDAR, Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) para obtener una imagen escaneada completa de los olivos, según el procedimiento propuesto por Hadas y cols. (2017). Para cada uno de los árboles singulares se registraron las siguientes mediciones: ubicación, perímetro a 130 centímetros del suelo, altura mínima del perímetro, perímetro de la base, diámetro máximo de copa y volumen de copa, entre otras observaciones.

MATERIAL Y MÉTODOS

Caracterización molecular

El análisis genotípico se llevó a cabo en 92 olivos (tabla III), clasificados como variedad desconocida o que presentaba incertidumbres en la caracterización visual. Además, algunas variedades locales, identificadas previamente hace años, se incorporaron al análisis por estar situadas fuera de sus áreas de distribución reconocidas. El análisis mostró individuos asociados a 29 variedades no identificadas ni clasificadas previamente en el BGMO. El análisis de emparejamiento multilocus por pares mostró 58 genotipos no redundantes y 44 individuos con genotipo redundante pertenecientes a 12 variedades distintas, las cuales incluyeron entre 2 y 8 individuos redundantes, es decir, pertenecientes a la misma variedad o genotipo, aunque muestreados en localizaciones distintas. De los 46 individuos restantes, cada uno presentaba un genotipo único y característico. Cabe destacar que las muestras Acebuche_1 y Acebuche_2, pertenecientes al mismo cultivar (Acebuche) y originarias de la misma localidad (Boltaña), y Buera_1 y Buera_2 (de cultivar y localidad Buera), presentaron genotipos distintos. Además, las variedades Minutera de Boltaña y Minutera de Labata, consideradas sinónimas, mostraron genotipos diferentes.

El análisis de la diversidad genética realizado mediante los 96 marcadores EST-SNP de los 58 genotipos no redundantes reveló un número medio de alelos efectivos por locus (N_e) de 1,78. Los valores de frecuencia alélica menor (MAF) oscilaron entre 0,07 y 0,49, con una media de 0,34.

La mayoría de los 96 EST-SNP (65/96, el 67,7 %) presentaron valores de MAF superiores a 0,30. El índice de información de Shannon (I) mostró un rango de 0,25 a 0,69, con un valor medio de 0,62. Al examinar la heterocigosidad, los valores observados (H_o) oscilaron entre 0,14 y 0,76, con una media de 0,48, mientras que la heterocigosidad esperada (H_e) se situó entre 0,13 y 0,5, con un valor medio de 0,43. Un 80,2 % de los EST-SNPs (77/96) mostraron valores de contenido de información polimórfica (PIC) superiores a 0,30.

Los dos primeros ejes del PCoA representaron el 10,32 % y el 8,04 % de la varianza total respectivamente (fig. 2). Debido a la naturaleza del estudio, no es posible determinar la presencia de una estructura poblacional entre los genotipos estudiados asociada a su localización geográfica. No obstante, en la sección siguiente se comentan algunas tendencias al respecto.

El análisis de la estructura genética poblacional identificó $K = 4$ como el número más probable de grupos. Utilizando los coeficientes de mezcla (matriz Q) (fig. 3a), se evaluaron los genotipos individuales para determinar su proporción de pertenencia a cada grupo (K1 a K4). El más grande, K1, incluye 28 de los 58 genotipos, seguido de K4 con 12 y K2 y K3 con 9 cada uno. Dentro de cada grupo algunos genotipos presentan una mezcla ancestral (*ancestral mixture*) limitada. Por ejemplo, genotipos como Alía, Olivonero de Ayerbe, Cerruda de Liesa, Cerruda de Olvena, Gordal de Somontano, Nación, Neral, Rañinera y Salenca, en el grupo K1; Hojiblanca y Manzanilla de Sevilla, en el K2; Dulcera, Minutera de Labata y Olivonero de Alastuey, en el K3, y Bolvino, Pueyo de Araguás, Negral de Bierge, Panseñera y Verdal de Fígols, en el K4. Sin embargo, ciertos genotipos mostraron una notable mezcla ancestral con dos o más grupos predominantes, por ejemplo Aceitunero-2249 y Acebuche_1, agrupados en K1, con altas proporciones ancestrales tanto para K1 como para K4; en K2, Verto y Castanero, con proporciones ancestrales similares para K1, K2 y K4; los genotipos Royeta de Hoz, Buera_1 y Panseña fina, agrupados en K3, con elevadas proporciones ancestrales para los grupos K1 y K3, y Royeta de Baells, con proporciones de los grupos K2, K3 y, en menor medida, K4; y en el grupo K4, Caspolina y Olivera de Nadal, con proporciones ancestrales de K2 y K1 respectivamente. Esta mezcla ancestral de

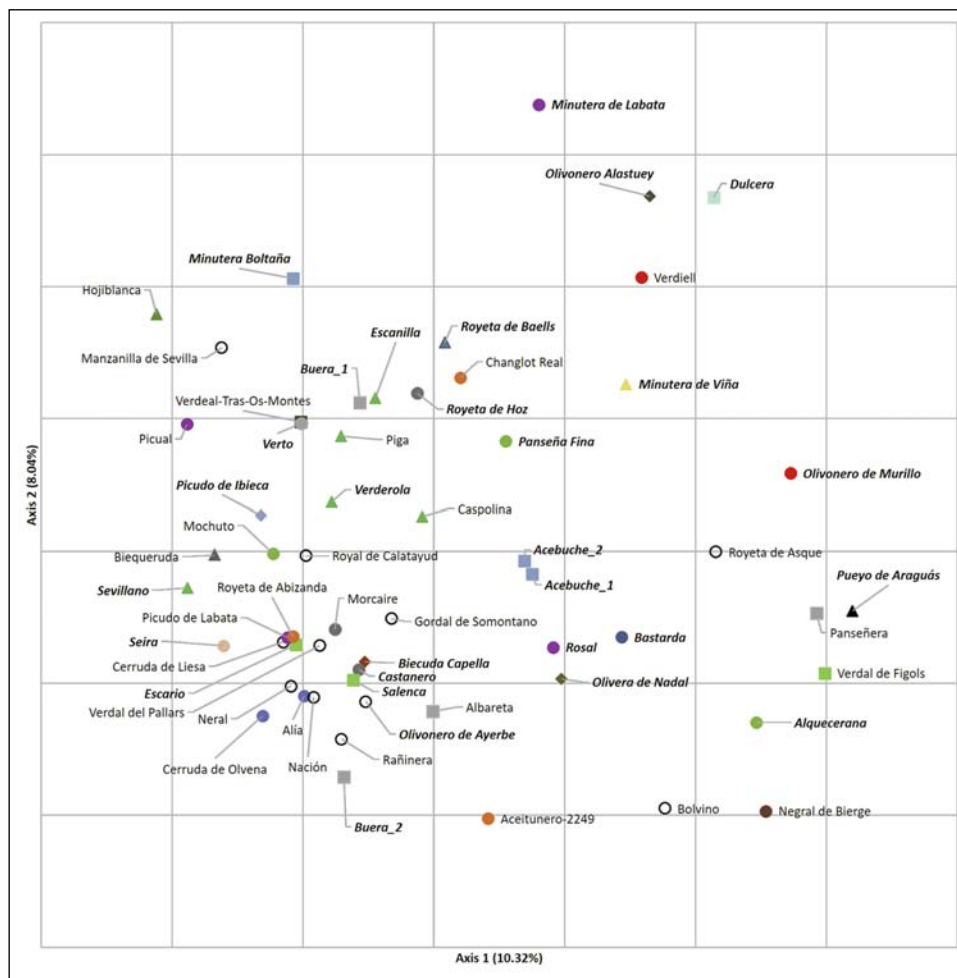


Fig. 2. Análisis de coordenadas principales (PCoA), calculado por GenAIEx 6.503 a través de una matriz de covarianza con estandarización de datos, utilizando la distancia genética entre 58 genotipos no redundantes basados en 96 marcadores EST-SNP. Las nuevas variedades aparecen en letra cursiva y negrita. Los mismos símbolos y colores indican la misma localidad de origen del olivo. El círculo blanco se utilizó como símbolo genérico en referencia a genotipos que incluyen múltiples muestras de diferentes ubicaciones.

algunos genotipos también se detectó en el PCoA, donde aquellos con una alta mezcla de proporciones ancestrales se situaron muy cerca de genotipos de otros grupos (por ejemplo, Castanero, Buera_1, Pansea fina y Royeta de Baells) (fig. 3b).

Caracterización de aceites monovarietales

En la tabla 1 se muestran los resultados del índice de madurez de las 8 variedades de aceituna oscenses seleccionadas con diferentes genotipos. La elección de estas variedades estuvo guiada por múltiples criterios. Lo más importante fue la calidad del aceite, según lo indicado por los agricultores que participaron en la encuesta. Además, se tuvieron en cuenta los patrones de producción bienales observados en variedades específicas durante el año de estudio, la amplia disponibilidad de aceitunas para cosechar de los árboles, el estado sanitario de las aceitunas en ciertas variedades y la restricción presupuestaria del proyecto, que obligó a limitar los análisis a 8 variedades. La variedad Blancal presentó el mayor índice de madurez (5), seguida de Minutera de Labata (4,9) y Gordera de Abizanda (4,3), y la variedad Rosal, el menor índice de madurez, con 2,5 al inicio del envero.

Las diferentes variedades mostraron rendimientos notablemente diferentes en la extracción de aceite. La que presentó mayor rendimiento fue Blancal, con un 22,8 %, probablemente relacionado con un mayor índice de madurez. La variedad Olivonero de Ayerbe también tuvo un alto rendimiento de extracción de aceite (21,9 %), incluso con un índice de madurez más bajo. A su vez, la variedad Gordera de Abizanda tuvo el menor rendimiento en la extracción de aceite (8,1 %), lo que se puede atribuir al alto contenido de hueso en estos frutos.

Todos los parámetros fisicoquímicos (acidez, índice de peróxidos, K232 y K270) de los aceites se encontraban dentro de los límites establecidos por la normativa europea para la categoría de aceite de oliva virgen extra (COI, 2018). Las variedades Mochuto y Minutera de Viña tenían un contenido de fenoles totales muy alto, lo cual es relevante dado que son antioxidantes naturales. El contenido en ácido oleico osciló entre el 66,19 % para el aceite de oliva Blancal y el 79,22 % para el Rosal. En cuanto a los esteroides totales, el Blancal destacó por su altísimo contenido. En cuanto a la estabilidad a la oxidación, fue de aproximadamente 30 horas en Minutera de Labata y Minutera de Alquézar, resultado consistente con sus elevados contenidos de fenoles totales y ácido oleico.

En cuanto al análisis sensorial, se detectaron diferencias importantes entre las variedades. El aceite de oliva con mejor calidad sensorial fue el de la variedad Alía, con un frutado mayor, con notas florales y bajos valores

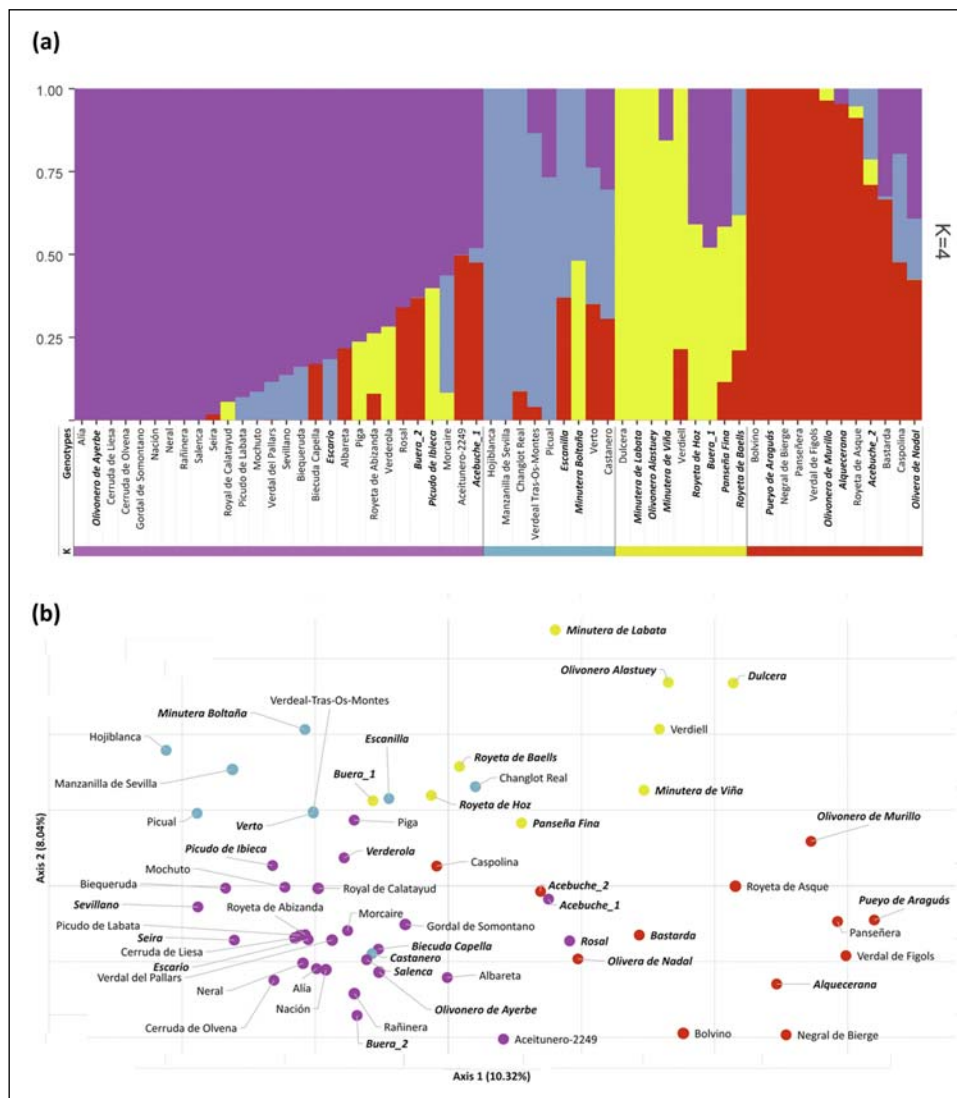


Fig. 3. a) Representación de la estructura poblacional mediante diagrama de barras basada en las proporciones de los coeficientes de ascendencia (matriz Q), utilizando el panel de 96 EST-SNP de 58 genotipos no redundantes calculados por el paquete LEA de R. b) Análisis de coordenadas principales (PCoA) que muestra los genotipos coloreados según el grupo ancestral predominante. K indica el número de clústeres. Las nuevas variedades aparecen en letra cursiva y negrita.

de amargor y picante medio. El aceite de la variedad Mochuto también tuvo un alto frutado, con notas de plátano, aunque con mayores valores de picante y amargor. Los aceites de las variedades Blancal y Olivonero de Ayerbe presentaron pequeños defectos de envejecimiento. En el primer caso, esto podría deberse al alto grado de maduración de las aceitunas; en el segundo, a que el aceite no estaba filtrado. No obstante, se necesitarían más análisis sensoriales para confirmar estos hallazgos. Otros aceites se clasificarían como aceites de oliva virgen extra.

Censo de árboles singulares

En cuanto al segundo enfoque para la valorización del patrimonio del olivo, las figuras 4 y 5 ilustran los resultados derivados de la aplicación del escaneo de precisión milimétrica basado en LiDAR para la catalogación

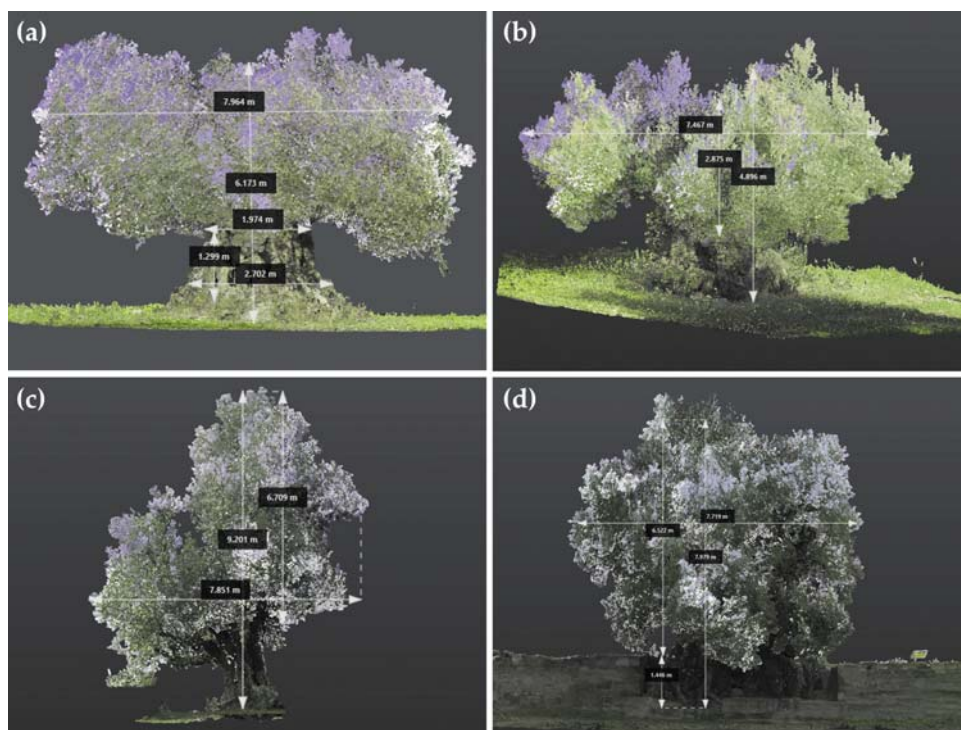


Fig. 4. Ejemplos de escaneo mediante LiDAR de árboles monumentales en las localidades de Santa Eulalia de Gállego (a), Riglos (b), Guaso (c) y Colungo (d).

Tabla 1. Caracterización de aceites monovarietales obtenidos a partir de 8 variedades de la provincia de Huesca: índice de madurez de la aceituna, rendimiento graso, parámetros fisicoquímicos y atributos sensoriales.

Parámetros fisicoquímicos											Atributos sensoriales		
Variedad	Índice de madurez	Rendimiento (%)	Acidez (%)	Índice de peróxido (meqO ₂ /kg)	K232	K270	Fenoles totales (mg/kg)	Ácido oleico (%)	Esteroles (mg/kg)	Estabilidad a la oxidación (h)	Afrutado	Amaror	Espe-ciado
Mochuto	3,8	14,5	0,20 ± 0,02	3,5 ± 0,5	1,96 ± 0,10	0,17 ± 0,01	1026	75,94 ± 0,30	1235	21,5	4,7	4,5	4,2
Olivonero de Ayerbe	3,6	21,9	0,15 ± 0,02	4,7 ± 0,7	1,67 ± 0,08	0,10 ± 0,01	580	75,05 ± 0,30	1147	17,0	2,9	0,5	3,3
Alía	4,0	17,6	0,18 ± 0,02	3,5 ± 0,5	1,54 ± 0,08	0,10 ± 0,01	451	76,47 ± 0,31	1484	17,3	5,8	1,4	3,3
Blancal	5,0	22,8	0,16 ± 0,02	2,1 ± 0,3	1,83 ± 0,09	0,14 ± 0,01	800	66,19 ± 0,26	1645	13,7	3,3	4,0	3,7
Rosal	2,5	16,5	0,16 ± 0,02	4,5 ± 0,7	1,73 ± 0,08	0,13 ± 0,01	653	79,22 ± 0,32	1266	17,6	4,3	0,4	3,7
Gordera de Abizanda	4,3	8,1	0,17 ± 0,02	1,7 ± 0,3	1,62 ± 0,08	0,13 ± 0,01	753	75,96 ± 0,30	836	24,4	3,7	1,9	2,5
Minutera de Viña	3,6	17,1	0,22 ± 0,02	4,2 ± 0,6	1,74 ± 0,09	0,16 ± 0,01	864	78,10 ± 0,31	902	29,9	2,2	1,6	3,2
Minutera de Labata	4,9	10,3	0,13 ± 0,01	2,2 ± 0,3	1,64 ± 0,08	0,12 ± 0,01	691	76,99 ± 0,31	974	30,7	2,8	1,0	3,9

de los árboles singulares. A diferencia del largo proceso de caracterización manual convencional, esta técnica facilitó la creación de un gemelo digital en el momento de la recopilación de datos en aproximadamente 2 minutos. Este gemelo digital se puede revisar o utilizar para la extracción directa de parámetros de caracterización morfológica.

En la tabla II también se presentan los resultados del análisis sobre la edad de los olivos centenarios mediante diversas fórmulas de tasa de crecimiento: varias ecuaciones, basadas en las tasas de crecimiento radial, el radio a una altura de 1,0 metros en centímetros, el diámetro a una altura de 1,3 metros en centímetros y el perímetro en metros. Estas ecuaciones, derivadas de los estudios de Michelakis (2002), Pannelli y cols. (2009), Arnan y cols. (2012), Koniditsiotis (2020) y Camarero y cols. (2024), permitieron estimar la edad de los olivos antiguos.

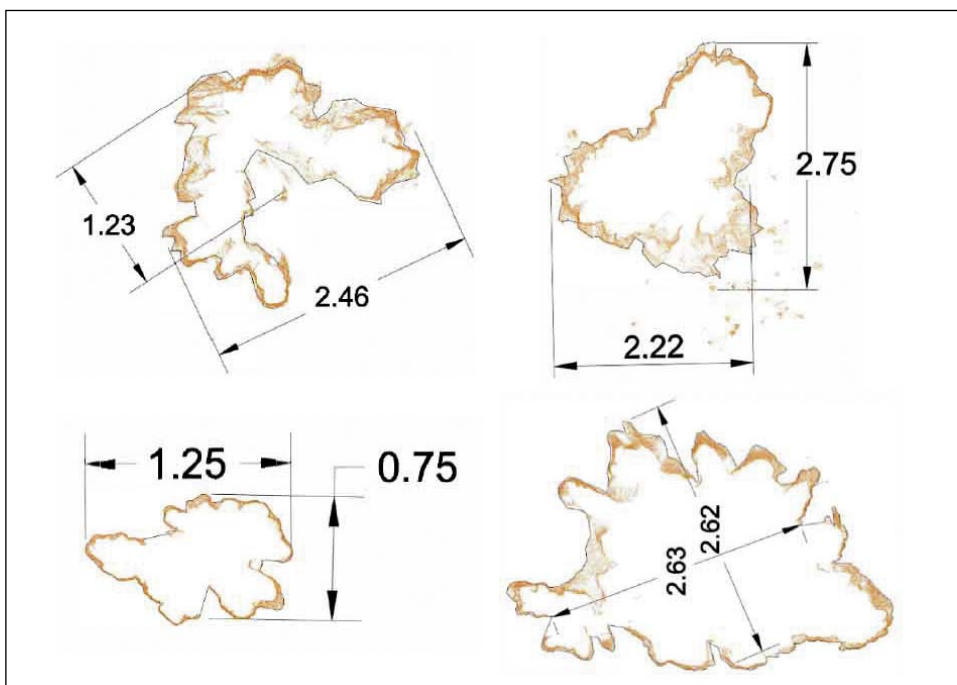


Fig. 5. Ejemplos de resultados del escaneo mediante LiDAR de los olivos monumentales mostrados en la figura 4: secciones transversales de árboles monumentales, a 1,3 metros sobre el nivel del suelo, en las localidades de Santa Eulalia de Gállego (a), Riglos (b), Guaso (c) y Colungo (d). Dimensiones, en metros.

Tabla II. Perímetros y áreas de las secciones a 1,30 metros sobre el nivel del suelo, junto con estimaciones de edad, para los ejemplos de árboles monumentales escaneados con LiDAR que se presentan en las figuras 4 y 5.

Localidad	Variedad	Perímetro (m)	Área (m²)	Diámetro (mm)	Edad				
					Michelakis (2002)	Pannelli y cols. (2009)	Arnan y cols. (2012)	Koniditsiotis (2020)	Camarero y cols. (2024)
Santa Eulalia de Gállego	Nueva variedad	10,78	2,26	2540	1693	1600	790	300	390
Riglos	Rañinera	10,07	3,68	2860	1907	1801	890	370	563
Guaso	Rañinera	4,25	0,59	1350	900	850	420	231	286
Colungo	Nueva variedad	16,15	5,52	3350	2233	2110	1042	533	654

La tabla III detalla los resultados del estudio del material vegetal por localidades, los olivos seleccionados para el análisis del ADN, los resultados de la comparación del análisis (BGMO), las variedades interesantes (nuevo genotipo) y algunas observaciones.

Tabla III. Resultados del estudio del material vegetal según las distintas localidades; los olivos seleccionados para el análisis del ADN; resultados del análisis con el material del BGMO; variedades interesantes (nuevo genotipo) y observaciones.

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Abiego	Alcampelina de Abiego	No			
Abizanda	Aceitunero	Sí	Changlot real		Variedad de Valencia
	Albás	No			
	Blancal	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
	Gordera de Abizanda	Sí	Nación		Variedad de Huesca
	Royeta de Abizanda	Sí	Royeta de Abizanda		Variedad de Huesca
	Royeta de Abizanda	Sí	Royeta de Abizanda		Variedad de Huesca
	Cerruda	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
	Gordal	No			
	Aceitunero_B	Sí	Aceitunero-2249		Variedad de La Rioja
Aínsa	Raínera	No			
	Raínera	No			
Albelda	Negreta	Sí	Manzanilla de Sevilla		
	Seira	Sí	Por asignar	Seira	Nueva variedad
Alquézar	Alquecerana	Sí	Por asignar	Alquecerana	Nueva variedad
	Mochuto	Sí	Mochuto		Variedad de Huesca
	Panseñera	Sí	Panseña		
	Panseña fina	Sí	Por asignar	Panseña fina	Nueva variedad
	Albás	Sí	Verdal del Pallars		Variedad de Cataluña
	Neral	Sí	Neral		Variedad de Huesca
Aniés	Olivo Celia	Sí	Por asignar	Olivonero de Ayerbe	Nueva variedad

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Apiés	Olivonero de Apiés	No			
	Olivonero	No			
Artasona	Alía	Sí	Alía		Variedad de Huesca
	Cerruda de Artasona	Sí	Cerruda de Olvena		Variedad de Huesca
Asque	Royeta Asque	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
	Royeta	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
	Cerecera	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
	Bastarda	Sí	Por asignar	Bastarda	Nueva variedad
Ayerbe	Negral 1	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Olivonero de Ayerbe	Sí	Por asignar	Olivonero de Ayerbe	Nueva variedad
	Negral	No			
	Olivonero	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Azlor	Olivera del Monte del Barón	No			
	Roya	No			
	Neral	No			
Baells	Royeta Baells	Sí	Por asignar	Royeta de Baells	Nueva variedad
Banastón	Rañinera	No			
	Rañinera	No			
	Rañinera	No			
Barbuñales	Verdeña	No			
	Verdeña	No	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Benabente de Aragón	Biecuda de Benavente	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
Berbegal	Verto	Sí	Por asignar	Verto	Nueva variedad
Bierge	Negral de Bierge	Sí	Negral de Bierge		Variedad de Huesca
Binéfar	Manzanilla	Sí	Hojiblanca		
Boltaña	Minutera	Sí	Por asignar	Minutera de Boltaña	Nueva variedad
	Cerruda	Sí	Neral		Variedad de Huesca

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
	Acebuche_1	Sí	Por asignar	Acebuche_1	Nueva variedad
	Acebuche_2	Sí	Por asignar	Acebuche_2	Nueva variedad
Buera	Albaretá	Sí	Albaretá		Variedad de Huesca
	Sebastián	Sí	Nación		Variedad de Huesca
	Olivo de la iglesia	Sí	Por asignar	Buera_1	Nueva variedad
	Falsa Blancal	Sí	Por asignar	Buera_2	Nueva variedad
Capella	Biecuda de Capella	Sí	Por asignar	Biecuda de Capella	Nueva variedad
Castillazuelo	Neral	No			
	Albás	No			
Colungo	Olivera de Nadal	Sí	Por asignar	Olivera de Nadal	Nueva variedad
Cregenzán	Gordal Cregenzán	Sí	Gordal de Somontano		Variedad de Huesca
Enate	Enate	Sí	Royeta de Asque		Variedad de Huesca
Escanilla	Tempraneta	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
	Cerruda 1	No			
	Desconocida	Sí	Por asignar	Escanilla	Nueva variedad
	Desconocida 2	No			
	Desconocida 3 San Juan	No			
	Injerto	Sí	Caspolina		Variedad de Aragón
	Mochuda	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
	Sevillano	Sí	Por asignar	Sevillano_1	Nueva variedad
	Tempraneta	No			
	Verderola	Sí	Por asignar	Verdolera	Nueva variedad
Estadilla	Nación	Sí	Nación		Variedad de Huesca
	Piga	Sí	Piga		Variedad de Huesca
Guaso	Guaso 1	Sí	Raínera		Variedad de Huesca
Hoz de Barbastro	Castanero	Sí	Por asignar	Castanero	Nueva variedad
	Dulce	Sí	Neral		Variedad de Huesca
	Picaceta	Sí	Morcaire		Variedad de Cataluña
	Royeta de Hoz	Sí	Por asignar	Royeta de Hoz	Nueva variedad

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Hoz de Barbastro	Ley de Coronas	No			
Huesca	Olivo de la escuela	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Ibica	Picudo de Ibica	Sí	Por asignar	Picudo de Ibica	Nueva variedad
Ipiés	Monasterio Fanlo 1	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Monasterio Fanlo 2	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Labata	Minutera de Labata	Sí	Por asignar	Minutera de Labata	Nueva variedad
	Minutera	No			
	Picudo de Labata	Sí	Picudo de Labata		Variedad de Huesca
	Rosal	Sí	Por asignar	Rosal	Nueva variedad
	Sevillano de Labata	Sí	Picual		
Lamata	Blancal Lamata	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
	Desconocida 1	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Desconocida 2	Sí	Bolvino		Variedad de Aragón
Lascuarre	Biequeruda	Sí	Biequeruda		Variedad de Huesca
Liesa	Cerruda	Sí	Cerruda de Liesa		Variedad de Huesca
	Negral	No			
Loscertales	Blancal	No			
	Roya	No			
Murillo de Gállego	Olivonero de Murillo	Sí	Por asignar	Olivonero de Murillo	Nueva variedad
	Alcampelina	Sí	Verdiell		
	Alquecerana	Sí	Nación		Variedad de Huesca
Peralta de Alcofea	Bravo Peralta	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Peralta de la Sal	Apegalosa	No			
	Blancal	No			
	Manzanilla	No			

Tabla III. (continuación)

<i>Localidad</i>	<i>Nombre local</i>	<i>Análisis</i>	<i>Nombre en el BGMO</i>	<i>Nombre provisional del genotipo</i>	<i>Comentarios</i>
Piracés	Verdeña de Piracés	No			
Pueyo de Araguás	Común_1	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Común_2	Sí	Neral		Variedad de Huesca
	Pueyo_ Desconocida	No			
	Distinta_Pueyo	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Desconocida 2	Sí	Por asignar	Pueyo de Araguás	Nueva variedad
Radiquero	Minutera de Radiquero	No			
	Minutera de Viña	Sí	Por asignar	Minutera de Viña	Nueva variedad
Secastilla	Biequeruda	No			
Riglos	Verdeña	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
Roda	Olivonero_1	No			
	Olivonero_2	No			
Salas	Gordal de Salas	Sí	Manzanilla de Sevilla		
Santa Eulalia de Gállego	Casa Valentín	Sí	Por asignar	Olivonero de Ayerbe	Nueva variedad
	Olivonero de Santa Eulalia	Sí	Gordal de Somontano		Variedad de Huesca
	Olivonero de Ayerbe	No			
	Olivonero Alastuey	Sí	Por asignar	Olivonero Alastuey	Nueva variedad
	Verdeña	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
Sariñena	Dulcera	Sí	Por asignar	Dulcera	Nueva variedad
Sopeira	Alargada	Sí	Royal de Calatayud		Variedad de Aragón
	Casa Frasco	Sí	Verdal del Pallars		Variedad de Cataluña
	Escario	Sí	Por asignar	Escario	Nueva variedad
	Grosal_Rañinera	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Mugrón	Sí	Rañinera		Variedad de Huesca
	Salenca	Sí	Por asignar	Salenca	Nueva variedad
Castilla y León	Choricera	Sí	Verdeal Trás-Os-Montes		Variedad de Portugal

DISCUSIÓN

Diversidad genotípica de las variedades tradicionales de olivo

El panel de 96 marcadores EST-SNP, validado por Belaj y cols. (2018 y 2022), ha demostrado su eficacia en la detección de genotipos redundantes y nuevos en el presente artículo. En nuestro análisis multilocus descubrimos que 44 de los 90 individuos muestreados eran genotípicamente redundantes. Los genotipos redundantes, incluso entre diferentes accesiones de bancos de germoplasma de olivo, se han identificado sistemáticamente en diversos estudios (Trujillo y cols., 2013; Belaj y cols., 2022; Mousavi y cols., 2017). Entre los genotipos no redundantes, 29 pertenecen a variedades no incluidas en el BGMO. Este conjunto de variedades tradicionales de olivo no genotipadas previamente representa un valioso recurso genético como fuente de diversidad genética.

Los valores de diversidad genética (N_e , MAF, H_o , H_e , I y PIC) obtenidos en este artículo, utilizando un tamaño muestral de genotipos no redundante entre 56 y 58, coincidieron con los valores medios publicados por Belaj y cols. (2022), con un tamaño muestral de genotipos no redundante entre 644 y 668. El PCoA mostró proporciones de la varianza total explicada semejantes a las publicadas por Belaj y cols. (2022), con valores de 10,99 % (eje 1) y 7,73 % (eje 2). Sin embargo, en este artículo la limitación en el número de individuos y de variedades muestreadas, así como la reducida distribución geográfica del muestreo, introducen un sesgo en la estructura poblacional imputada. Estudios previos llevados en un mayor rango de distribución geográfica han detectado estructuras genéticas poblacionales que, en algunos casos, están parcialmente asociadas con la localización de las variedades / cultivares analizados (D'Agostino y cols., 2018; Belaj y cols., 2022; Kaya y cols., 2013; Mousavi y cols., 2017; Belaj y cols., 2011). Miazzi y cols. (2020) estudiaron 177 genotipos procedentes de germoplasma de olivo raro y antiguo muestreados en la región italiana de Apulia. El estudio abarcaba análisis morfológicos, moleculares (marcadores microsatélites), tecnológicos y de estado fitosanitario, comparando estos genotipos con cultivares de referencia. El análisis de la estructura poblacional reveló una clara separación entre el germoplasma nacional italiano y las variedades examinadas localmente. Por el contrario, estudios como el realizado por Biton y cols. (2015) agruparon los cultivares en función de su finalidad

(aceite, mesa o doble finalidad) y no de su origen geográfico. En ese estudio no se exploró la correlación entre la estructura de la población y los parámetros fisicoquímicos o los atributos sensoriales del aceite, centrándose en la caracterización de variedades tradicionales y olivos singulares situados en el Alto Aragón mediante diversos enfoques tanto morfológicos y oleícolas como genotípicos.

Dado el tamaño de la muestra y el número de marcadores moleculares, este estudio no profundiza en aspectos filogenéticos, ya que para ello sería necesario un muestreo más amplio de variedades y la inclusión de algunas de referencia. No obstante, es plausible formular hipótesis sobre ciertas relaciones genotípicas y estructuras poblacionales putativas dentro de la zona muestreada. Los genotipos agrupados en el grupo más grande, K1, muestran una distribución geográfica predominante oeste-este, mientras que el grupo K2 lo hace de noreste a sureste. Los grupos K3 y K4 agrupan genotipos del centro y del este, pero el K3 también incluye genotipos del sureste, lo que contrasta con el K4, que comprende genotipos del noreste. Variedades como Hojiblanca, Picual y Manzanilla de Sevilla, tradicionalmente extendidas en los olivares del sur de España (Andalucía y Extremadura), junto con Changlot real en el este de España (Valencia) (Barranco Navero y cols., 2017) y Verdeal Trás-Os-Montes en Portugal (Cordeiro y cols., 2013), se agrupan junto con variedades minoritarias del Alto Aragón como Escanilla, Minutera de Boltaña, Verto y Castanero, en el grupo K2 (fig. 3). Esto puede deberse a que estas variedades altoaragonesas presentan una marcada mezcla en sus proporciones de ancestralidad, a diferencia de aquellas cultivadas en las regiones del sur y el este de España mencionadas anteriormente. En conjunto, la caracterización genotípica llevada a cabo en este artículo ha resultado valiosa para identificar genomas redundantes y novedosos entre las variedades tradicionales de olivo del Alto Aragón, aumentando el conocimiento de la diversidad genética presente en este cultivo.

Sobre los aceites monovarietales

Los 8 aceites de oliva monovarietales, a excepción del Blancal y el Olivonero de Ayerbe debido a defectos menores identificados en el análisis sensorial, cumplían los criterios de clasificación del aceite de oliva virgen extra según los parámetros fisicoquímicos y atributos sensoriales especificados en

la normativa europea (European Commission, 2022). Sin embargo, se observaron diferencias notables tanto en la composición de los frutos como en los aceites de oliva resultantes. El índice de madurez, que oscila entre 2,5 (indica el inicio del envero, con poca superficie coloreada de púrpura) para Rosal y 5 (indica el final del envero, cuando la aceituna adquiere color púrpura o negro) para las aceitunas Blancal, influyó significativamente en el rendimiento del aceite de oliva, que varió de 10,3 % a 22,8 %, y en la calidad (Uceda Ojeda y Hernández Fernández, 2017). Los mayores índices de madurez se asociaron con un mayor rendimiento de aceite de oliva. En el caso de la Minutera de Labata, el menor rendimiento podría atribuirse al gran tamaño del hueso.

También se observaron variaciones sustanciales en el contenido de fenoles totales de los aceites de oliva monovarietales, que oscilaron entre 451 miligramos por kilo para la variedad Alía y 1026 para Mochuto (más del doble). Estos valores superan a los de otros aceites varietales de Aragón, como Royal de Calatayud, Negral de Sabiñán, Arbequina (Rey Giménez y cols., 2023) o Empeltre (Abenoza y cols., 2018). El ácido oleico, un componente crucial del aceite de oliva, mostró un rango de 66,19 % a 79,22 %. El menor contenido se encontró en el aceite de oliva de las aceitunas más maduras (Blancal), mientras que el mayor fue el de las aceitunas menos maduras (Rosal). Este último contenido fue similar al descrito en trabajos anteriores para aceites de oliva aragoneses de las variedades Racimilla (Benito y cols., 2010) y Verdeña (Benito y cols., 2012). Además, se observaron diferencias en el contenido total de esteroides entre los 8 aceites de oliva monovarietales: la mayoría superaron los 1000 miligramos por kilo, límite establecido por la normativa europea para las características de pureza del aceite de oliva virgen extra (European Commission, 2022). Los aceites de Blancal presentaron el mayor contenido de esteroides, mientras que Gordera de Abizanda, Minutera de Alquézar y Minutera de Labata se mantuvieron dentro de los límites especificados.

Sorprendentemente, la estabilidad a la oxidación varió de forma significativa, con Minutera de Labata demostrando una estabilidad muy alta (30,7 horas) y los aceites de Blancal exhibiendo una estabilidad muy baja (13,7 horas). En todos los casos, excepto en Blancal, los valores superaron los reportados para otros aceites monovarietales de Aragón (Rey Giménez

y cols., 2023), con Empeltre mostrando valores inferiores (10,03 horas) (Abenoza y cols., 2018).

Todos los aceites de oliva presentaron atributos sensoriales positivos, incluyendo notas frutales, especiadas y amargas, excepto el Blancal y el Olivonero de Ayerbe, donde se detectaron pequeños defectos. Cabe destacar que el aceite de oliva Alía destacó como el más afrutado, mientras que el de la variedad Mochuto mostró las características amargas y picantes más pronunciadas, lo que se correlaciona con su alto contenido en fenoles totales. No se han documentado estudios previos sobre las propiedades organolépticas de estos aceites de oliva monovarietales.

Teniendo en cuenta tanto la composición química como la calidad sensorial, la producción de aceites de oliva monovarietales únicos podría ser una estrategia valiosa para la valorización de estas aceitunas autóctonas. Desde el punto de vista nutricional, los aceites de oliva monovarietales de Mochuto podrían ser especialmente interesantes por su alto contenido en fenoles, mientras que Alía podría ser una opción atractiva por sus características sensoriales. Además, la mezcla de estos aceites de oliva podría ofrecer la oportunidad de combinar los mejores atributos nutricionales y sensoriales.

Sobre la protección de los olivos monumentales

La valorización de los olivos monumentales se está llevando a cabo en toda la cuenca mediterránea, como lo ponen de manifiesto estudios previos realizados en Albania (Ismaili y Veshaj, 2014), Chipre (Anestiadou y cols., 2017), Líbano (Chalak y cols., 2015; Yazbeck y cols., 2018), Portugal (Velooso y cols., 2018), Italia (Licausi y cols., 2010; Criscuolo y cols., 2019; Schicchi y cols., 2021; Rotondi y cols., 2021; Ferrara e Ingemark, 2023), Israel (Petrucelli y cols., 2014 y 2021), Montenegro (Lazovic y cols., 2016), Creta (Bombarely y cols., 2021), Malta (Lageard y cols., 2021; Valeri y cols., 2022) y España (Díez y cols., 2011).

En el caso de España la protección de los olivos monumentales es reciente y no está legislada por el Gobierno español, aunque sí regulada en algunas comunidades autónomas, entre ellas Andalucía (Junta de Andalucía, 2015), Comunidad Valenciana (Comunidad Autónoma Valenciana,

2006), Cataluña (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2020) y Aragón (Comunidad Autónoma de Aragón, 2015). En Andalucía Gómez Gálvez y cols. (2018) consideran olivos singulares aquellos ejemplares que destacan por su tamaño (perímetro y altura del tronco), su antigüedad, su producción y su interés estético y paisajístico. Este último aspecto es un activo para el desarrollo sostenible y la competitividad regional, lo que ha llevado incluso a considerar su reconocimiento patrimonial al mayor nivel internacional (Sánchez Martínez y Garrido Almonacid, 2017).

En el caso particular de Aragón solo algunos olivos centenarios están protegidos a través de la figura de árboles y arboledas singulares de Aragón (Comunidad Autónoma de Aragón, 2015), que incluye uno de los olivos objeto de estudio, la Olivera de Nadal (Gobierno de Aragón, 2022).

El hallazgo de numerosos árboles monumentales en toda la provincia de Huesca ha sugerido su indexación y su estudio, tanto con fines de conservación (en virtud de la legislación de protección del árbol singular) como para fomentar el turismo relacionado con el aceite de oliva en estas zonas rurales (se pueden prever rutas en la Hoya de Huesca, en el somontano de Guara y en la parte más alta de las comarcas de Sobrarbe y Ribagorza). Esto implicaría replicar en esta provincia proyectos que han tenido éxito en otras regiones: por ejemplo, *Apadrinaunolivo.org*, que tiene como objetivo recuperar olivos abandonados con aportaciones de donantes privados, financiando el cuidado de estos olivos y su recuperación (Bejko y Pérez Pérez, 2016); *Prospección de los olivos monumentales de Andalucía* (Belaj y cols., 2005), que localiza y caracteriza los olivos mencionados, y *Sistema agrícola olivos milenarios del Territorio Sénia* (Antich, 2014; Ninot y cols., 2018), reconocido como Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) por la FAO, que no solo protege los olivos, sino que también los recupera, obtiene aceite y promueve el oleoturismo.

Limitaciones del estudio

En cuanto al análisis genotípico, la limitación en el número de muestras y la proximidad entre ellas, al centrarse el estudio en la provincia de Huesca, no permite extraer conclusiones sobre su estructura poblacional. La pequeña escala geográfica, así como la falta de información sobre los caracteres

morfológicos y fisiológicos, limita el desarrollo de conclusiones sobre el principal impulsor de la estructura poblacional de las muestras estudiadas más allá de la variedad a la que pertenecen. Por otro lado, sería necesario ampliar el número de muestras genotipadas en las que se analicen parámetros fisicoquímicos y organolépticos de sus aceites para determinar la influencia que estos atributos tienen o no en la estructura poblacional.

Sobre los aceites monovarietales, es crucial tener en cuenta que se necesitan investigaciones futuras para confirmar estos resultados preliminares. Dado que las 8 variedades de este estudio se cosecharon simultáneamente, es probable que las variaciones en el índice de madurez hayan afectado al rendimiento de la extracción, los parámetros fisicoquímicos y los atributos sensoriales. Los estudios posteriores deberían explorar la comparación de las variedades con un índice de madurez específico. Además, estudiar más años de cultivo y aumentar el volumen de la producción de aceite de oliva para realizar pruebas más amplias contribuiría a la solidez de los hallazgos. Las limitaciones para la valorización de estos aceites de oliva monovarietales se derivan de la superficie cultivada, que es relativamente pequeña. Para promover los aceites monovarietales comerciales, se recomienda realizar nuevas plantaciones de estas variedades en diferentes parcelas.

Respecto al censo monumental del olivo, es importante reconocer la existencia de hallazgos contradictorios en el campo de la estimación de la edad del olivo antiguo. Estudios recientes de Camarero y cols. (2021), Cherubini y cols. (2013), Cherubini y Lev-Yadun (2015) y Ehrlich y cols. (2017) han desafiado algunos de los supuestos y métodos utilizados en investigaciones previas. Camarero y cols. (2021) han sugerido que factores como las variaciones climáticas y las condiciones del suelo pueden influir significativamente en las tasas de crecimiento del olivo, lo que puede llevar a sobreestimaciones de la edad del árbol cuando se utilizan ciertas fórmulas. Cherubini y cols. (2013) han enfatizado la importancia de las técnicas dendrocronológicas para una determinación más precisa de la edad en olivos antiguos, destacando la necesidad de un enfoque multidisciplinario para la estimación de la edad que combine múltiples métodos para verificar los resultados de forma cruzada. Además, Ehrlich y cols. (2017) han planteado dudas sobre la fiabilidad del uso de ecuaciones de tasa de crecimiento lineal sin tener en cuenta los posibles patrones de crecimiento no

lineales en olivos antiguos. La reciente investigación de Camarero y cols. (2024) establece un avance que estima la edad mediante datación por carbono-14, ofreciendo un método más confiable para determinar la edad de olivos antiguos y desmitificar la abundancia de ejemplares milenarios. A la luz de estos hallazgos contradictorios, se hace evidente que la estimación de la edad de los olivos centenarios es un campo de investigación complejo y en evolución.

Las ecuaciones que utilizamos proporcionan un marco útil, pero deben considerarse junto con las ideas y las precauciones presentadas por los autores citados. La investigación futura debe tener como objetivo integrar estas variadas perspectivas y metodologías para mejorar nuestra comprensión de las verdaderas edades de estos notables árboles antiguos y los factores que influyen en su crecimiento.

CONCLUSIONES

El imperativo de reducir los insumos y adaptarse al cambio climático plantea nuevos desafíos para los cultivos futuros, lo que subraya la creciente necesidad de incorporar nuevas fuentes de variabilidad genética para el mejoramiento de cultivos. El análisis genotípico de este estudio identificó 29 variedades tradicionales de olivo no descubiertas previamente en el Alto Aragón, que ofrecen valiosos recursos genéticos para los programas de mejora del olivo. La conservación de estas variedades tradicionales ofrece una fuente de diversidad genética de la que sacar partido en el futuro y, a la vez, se perfila como crucial, ya que sirven como reservorio de recursos fitogenéticos. En un primer paso hacia su valorización, se elaboraron aceites de oliva monovarietales a partir de 8 de estas variedades, 6 de las cuales cumplían los criterios de aceite de oliva virgen extra según la normativa europea. Cabe reseñar que el aceite de oliva monovarietal de la variedad Mochuto destacó por su riqueza nutricional, con un alto contenido en fenoles, mientras que el aceite de oliva Alía presentó propiedades sensoriales distintivas.

Como enfoque alternativo o complementario de la valorización, se identificaron numerosos árboles monumentales en toda la provincia de Huesca, aptos para la conservación bajo la legislación de protección del árbol singular y como catalizadores para promover el turismo relacionado

con el aceite de oliva en las zonas rurales, especialmente en las comarcas del somontano de Guara, Sobrarbe y Ribagorza. Estos hallazgos subrayan el rico patrimonio olivarero del Alto Aragón y su potencial de valorización sin explotar.

RECOMENDACIONES

Respecto al análisis genotípico, la limitación en el número de muestras y la proximidad entre ellas, al centrarse el estudio en el Alto Aragón, no permite extraer conclusiones sobre su estructura poblacional. La pequeña escala geográfica, así como la falta de información sobre caracteres morfológicos y fisiológicos, limitan el desarrollo de las conclusiones sobre el principal motor de la estructura poblacional de las muestras estudiadas más allá de la variedad a la que pertenecen. Por otro lado, sería necesario aumentar tanto el tamaño muestral como el número de marcadores moleculares, así como incorporar análisis fisicoquímicos y organolépticos de sus aceites para determinar la influencia que estos atributos pueden tener en la estructura poblacional.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Diputación Provincial de Huesca a través del programa Félix de Azara.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abenoza, M., J. Raso, R. Oria y A. C. Sánchez Gimeno (2018). Modulating the bitterness of Empeltre olive oil by partitioning polyphenols between oil and water phases: Effect on quality and shelf life. *Food Sci. Technol. Int.*, 25: 47-55.
- Anestiadou, K., N. Nikoloudakis, M. Hagidimitriou y A. Katsiotis (2017). Monumental olive trees of Cyprus contributed to the establishment of the contemporary olive germplasm. *PLOS ONE*, 12: e0187697.
- Antich, J. (2014). Conservación y puesta en valor de los olivos milenarios del Territorio Sénia. PH. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 22: 2-4.
- Arnan, X., B. C. López, J. Martínez Vilalta, M. Estorach y R. Poyatos (2012). The age of monumental olive trees (*Olea europaea*) in northeastern Spain. *Dendrochronologia*, 30: 11-14.

- Barranco Navero, D., R. Fernández Escobar y L. Rallo Romero (2017). *El cultivo del olivo*. 7.^a ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 1008 pp.
- Baulny, O. (1968). Tres textos de Félix de Azara: los olivos de Alquézar. *Pirineos*, 73: 26-41.
- Bejko, A., y L. Pérez y Pérez (2016). *Rentabilidad financiera y análisis socio-ambiental de la recuperación del olivar abandonado en Oliete (Teruel)*. Unidad de Economía Agroalimentaria y de los Recursos Naturales. 66 pp.
- Belaj, A., C. Muñoz Díez, D. Barranco Navero y L. Rallo Romero (2005). Prospección y caracterización de los olivos singulares de Andalucía. En *Proceedings of the V Congreso Ibérico de Ciências Hortícolas. IV Congresso Iberoamericano de Ciências Hortícolas*: 147-151. Porto, Portugal, 22-27 de mayo de 2005.
- Belaj, A., M. d. C. Domínguez García, S. G. Atienza, N. Martín Urdíroz, R. de la Rosa, Z. Satovic, A. Martín, A. Kilian, I. Trujillo, V. Valpuesta y cols. (2011). Developing a core collection of olive (*Olea europaea* L.) based on molecular markers (DARs, SSRs, SNPs and agronomic traits). *Tree Genet. Genomes*, 8: 365-378.
- Belaj, A., R. de la Rosa, I. J. Lorite, R. Mariotti, N. G. M. Cultrera, C. R. Beuzón, J. J. González Plaza, A. Muñoz Mérida, O. Trelles y L. Baldoni (2018). Usefulness of a new large set of high throughput EST-SNP markers as a tool for olive germoplasm collection management. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1320.
- Belaj, A., A. Ninot, F. J. Gómez Gálvez, M. El Riachy, M. Gurbuz Veral, M. Torres, A. Lazaj, T. Klepo, S. Paz, J. Ugarte y cols. (2022). Utility of EST-SNP markers for improving management and use of olive genetic resources: A case study at the Worldwide Olive Germplasm Bank of Córdoba. *Plants*, 11: 921.
- Benito, M., R. Oria y A. Sánchez Gimeno (2010). Characterization of the olive oil from three potentially interesting varieties from Aragón (Spain). *Food Sci. Technol. Int.*, 16: 523-530.
- Benito, M., M. Abenoza, R. Oria y A. Sánchez Gimeno (2012). Physico-chemical, nutritional and sensory characterization of Verdeña, Verdilla and Royal varieties olive oil. *Riv. Ital. Sostanze Grasse*, 89: 319-325.
- Biton, I., A. Doron Faigenboim, M. Jamwal, Y. Mani, R. Eshed, A. Rosen, A. Sherman, R. Ofir, S. Lavee, B. Avidan y cols. (2015). Development of a large set of SNP markers for assessing phylogenetic relationships between the olive cultivars composing the Israeli olive germplasm collection. *Molecular Breeding*, 35: 1-14.
- Bombarely, A., A. G. Doulis, K. K. Lambrou, C. Zioutis, E. Margaritis y G. Koubouris (2021). Elucidation of the origin of the monumental olive tree of Vouves in Crete, Greece. *Plants*, 10: 2374.
- Camarero, J. J., M. Colangelo A. Gracia-Balaga, M. A. Ortega-Martínez y U. Büntgen (2021). Demystifying the age of old olive trees. *Dendrochronologia*, 65: 125802.
- Camarero, J. J., R. Touchan, C. Valeriano, I. Bashour y J. Stephan (2024). Dating the Noah trees to improve age estimates in centennial and millennial olive trees. *Dendrochronologia*, 84: 126181.

- Casanova, J., J. M. González y J. Viñuales (2013). Variedades de olivo cultivadas en la provincia de Huesca. *Lucas Mallada*, 15: 29-47.
- Chalak, L., H. Haouane, L. Essalouh, S. Santoni, G. Besnard y B. Khadari (2015). Extent of the genetic diversity in Lebanese olive (*Olea europaea* L.) trees: A mixture of an ancient germplasm with recently introduced varieties. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 62: 621-633.
- Cherubini, P., T. Humbel, H. Beeckman, H. Gärtner, D. Mannes, C. Pearson, W. Schoch, R. Tognetti y S. Lev-Yadun (2013). Olive tree-ring problematic dating: A comparative analysis on Santorini (Greece). *PLOS ONE*, 8: e54730.
- Cherubini, P., y S. Lev-Yadun (2015). The olive tree-ring problematic dating. *Antiquity*, 88: 290-291.
- COI (2018). *Sensory analysis of olive oil. Method for the organoleptic assessment of virgin olive oil (COI / T.20 / Doc. n.º 15 / Rev. 10)*. International Olive Oil Council. Madrid. 20 pp.
- Colás Latorre, G. (2015). Olivos y aceite en Aragón en la Edad Moderna. *Chron. Nova Rev. Hist. Mod. Univ. Granada*, 41: 71-98.
- Comunidad Autónoma de Aragón (2015). Decreto Legislativo 1/2015, de 29 de julio, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Espacios Protegidos de Aragón (BOA-d-2015-90531). Gobierno de España. Madrid. 44 pp.
- Comunidad Autónoma de Cataluña (2020). Ley 6/2020, de 18 de junio, de Protección, Conservación y Puesta en Valor de los Olivos y Olivares Monumentales (BOE-A-2020-7382). Gobierno de España. Madrid. 12 pp.
- Comunidad Autónoma Valenciana (2006). Ley 4/2006, de 19 de mayo, de Patrimonio Arbóreo Monumental (BOE-A-2006-11581). Gobierno de España. Madrid. 12 pp.
- Cordeiro, A., M. Santos, N. Morais y A. Miranda (2013). As variedades de oliveira de referência, Portugal oleícola. En J. Böhm (ed.), *O Grande Livro da Oliveira e do Azeite*: 188-220. Dinalivro. Lisboa.
- Criscuolo, N., F. Guarino, C. Angelini, S. Castiglione, T. Caruso y A. Ciatelli (2019). High biodiversity arises from the analyses of morphometric, biochemical and genetic data in ancient olive trees of south of Italy. *Plants*, 8: 297.
- D'Agostino, N., F. Tarento, S. Camposeo, G. Mangini, V. Fanelli, S. Gadaleta, M. M. Miazzi, S. Pavan, V. di Rienzo, W. Sabetta y cols. (2018). GBS-derived SNP catalogue unveiled wide genetic variability and geographical relationships of Italian olive cultivars. *Sci. Rep.*, 8: 15877.
- Díez, C. M., I. Trujillo, E. Barrio, A. Belaj, D. Barranco y L. Rallo (2011). Centennial olive trees as a reservoir of genetic diversity. *Ann. Bot.*, 108: 797-807.
- Ehrlich, Y., L. Regev, Z. Kerem y E. Boaretto (2017). Radiocarbon dating of an olive tree cross-section: New insights on growth patterns and Implications for age estimation of olive trees. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1918.

- El Bakkali, A., L. Essalouh, C. Tollon, R. Rivallan, P. Mournet, A. Moukhli, H. Zaher, A. Mekkaoui, A. Hadidou, L. Sikaoui y cols. (2019). Characterization of Worldwide Olive Germplasm Banks of Marrakech (Morocco) and Córdoba (Spain): Towards management and use of olive germplasm in breeding programs. *PLOS ONE*, 14 (10): e0223716.
- Elguea Blanco, J. A., A. Romero Aroca, B. Lizar, R. Peregrina, J. Rall i García, A. Íñiguez, J. Tous Martí, J. García, J. L. Plana, M. S. Gracia y cols. (2006). Producción y variedades. Selección clonal de la variedad de olivo “Empeltre” en el valle del Ebro e islas Baleares. *Frutic. Prof.*, 160: 13-20.
- Escudero Población, A., S. Manchego Losa y J. J. López López (2019). *Anuario de Estadística 2019. Estadísticas Agrarias y de Alimentación*. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. 856 pp.
- Espada Carbó, J., F. Abós Castel y M. Gracia Gómez (2009). *Variedades de olivo cultivadas en el somontano de Barbastro y características de sus aceites*: 1-13. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- European Commission (2022). *Commission Delegated Regulation (EU) 2022/2104 of 29 July 2022 supplementing Regulation (EU) No 1308/2013 of the European Parliament and of the Council as regards marketing standards for olive oil, and repealing Commission Regulation (EEC) No 2568/91 and Commission Implementing Regulation (EU) No 29/2012*. Official Journal of the European Union. Bruselas. 22 pp.
- FAO (2018). *Vías sostenibles para lograr la participación de la alimentación y la agricultura en el logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (COAG/2018/3/Rev. 1)*. Comité de Agricultura de la FAO. Roma.
- FAO (2020). *Estrategia de la FAO para la incorporación de la diversidad biológica en todos los sectores agrícolas*. FAO. Roma.
- Ferrara, V., y D. Ingemark (2023). The entangled phenology of the olive tree: A compiled ecological calendar of *Olea europaea* L. over the last three millennia with Sicily as a case study. *GeoHealth*, 7: e2022GH000619.
- Font i Forcada, C., A. Fernández i Martí, J. Viñuales, J. González, A. Oriol y M. J. Rubio Cabetas (2014). Estudio genético entre las distintas accesiones locales de olivo (*Olea europaea* L.) en la Comunidad de Aragón. *Rev. Frutic.*, 36: 30-48.
- Francis, R. M. (2017). Pophelper: An R package and web app to analyse and visualize population structure. *Mol. Ecol. Resour.*, 17: 27-32.
- Frichot, E., y O. François (2015). LEA: An R package for landscape and ecological association studies. *Methods Ecol. Evol.*, 6: 925-929.
- Gain, C., y O. François (2021). LEA 3: Factor models in population genetics and ecological genomics with R. *Mol. Ecol. Resour.*, 21: 2738-2748.
- García Vico, J., P. Gallardo Plaza y P. Moreno Doménech (2009). Patrimonio oleícola y puesta en valor de aceites típicos en circuitos comerciales de radio corto: labelización de agrotiendas. *Sumuntán: Anuario de Estudios sobre Sierra Mágina*, 27: 123-136.

- Gobierno de Aragón (2022). Orden AGM/526/2022, de 18 de abril, por la que se procede a la declaración del árbol singular de Aragón denominado “Olivera de Nadal”. Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Gómez Gálvez, F. J., J. Cano Rodríguez, A. Belaj Memaj y R. de la Rosa Navarro (2018). *Prospección de nuevos recursos genéticos de olivo en Andalucía*. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Junta de Andalucía. Jaén. 17 pp.
- Gómez Gálvez, F. J., A. Ninot, J. C. Rodríguez, S. P. Compañ, J. U. Andrevia, J. A. G. Rubio y A. Belaj (2024). New insights in the Spanish gene pool of olive (*Olea europaea* L.) preserved ex situ and in situ based on high-throughput molecular markers. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1267601.
- Gómez Rodríguez, M. V., C. Beuzon, J. J. González Plaza y A. M. Fernández Ocaña (2020). Identificación de una aceituna (*Olea europaea* L.) con un nuevo conjunto de marcadores SSR. *Jineta. Recursos. Crop Evol.*, 68: 117-133.
- Gracia, M. S., P. Marco, S. Bielsa, J. Espada y E. Arranz (2023). Estudio del momento óptimo de la recolección en la variedad “Empeltre” en el Bajo Aragón. En *Proceedings of the XII Simposium científico-técnico Expoliva. Foro de la Tecnología Oleícola y la Calidad*. TEC-30, Jaén, 10-12 de mayo de 2023.
- Hadas, E., A. Borkowski, J. Estornell y P. Tymkow (2017). Automatic estimation of olive tree dendrometric parameters based on airborne laser scanning data using alpha-shape and principal component analysis. *GISci. Remote Sens.*, 54: 898-917.
- Ismaili, H., y Z. Veshaj (2014). Determining the age of olive trees through morphometric methods. *Int. J. Agric. Innov. Res.*, 3: 574-578.
- Jahnke, G., J. Smidla y P. Poczai (2022). MolMarker: A simple tool for DNA fingerprinting studies and polymorphic information content calculation. *Diversity*, 14: 497.
- Jordán de Asso, I. (1798). *Historia de la economía política de Aragón*. IFC / Gara d'Edicions. Zaragoza.
- Junta de Andalucía (2015). Decreto 103/2015, de 10 de marzo, por el que se aprueba el Plan Director del Olivar (BOJA 19/03/2015). Junta de Andalucía. Sevilla. 147 pp.
- Kaya, H. B., O. Cetin, H. Kaya, M. Sahin, F. Sefer, A. Kahraman y B. Tanyolac (2013). SNP discovery by illumina-based transcriptome sequencing of the olive and the genetic characterization of Turkish olive genotypes revealed by AFLP, SSR and SNP markers. *PLOS ONE*, 8: e73674.
- Koniditsiotis, S. (2020). Registration and promotion of monumental olive trees in Greece. *Adv. Soc. Sci. Res. J.*, 7: 107-121.
- Lafuente Benaches, M. M. (2007). Concepto y protección del patrimonio arbóreo monumental. *Rev. Adm. Pública*, 172: 403-437.
- Lageard, J. G. A., D. Sultana y F. Q. Brearley (2021). Veteran trees in an historic landscape: The Bidnija olive grove, Malta. *J. Archaeol. Sci. Rep.*, 38: 103094.

- Lazovic, B., M. Adakalic, C. Pucci, T. Perovic, D. Bandelj, A. Belaj, R. Mariotti y L. Baldoni (2016). Characterizing ancient and local olive germplasm from Montenegro. *Sci. Hortic.*, 209: 117-123.
- Licausi, E., N. Di Virgilio, A. Rotondi y M. Magli (2010). Olive tree in Emilia Romagna region: An ancient crop, a new environmental and cultural economic resource. *Ital. J. Agron.*, 5: 27.
- López Bermúdez, F., F. Alonso Sarriá, C. Conesa García, E. Hernández Laguna e Y. Álvarez Rogel (2004). La huella ecológica del cultivo del olivo en España y su aplicabilidad como indicador de agricultura sostenible. *Papeles de Geografía*, 39: 141-155.
- Mallor, C., E. Igartua y P. Errea (2014). Las variedades tradicionales en el panorama actual de la mejora y la producción sostenible. En R. Socías i Company, M. J. Rubio Cabezas, A. Garcés-Claver, C. Mallor y J. M. Álvarez (eds.), *La obtención de variedades: desde la mejora clásica a la mejora genética molecular*: 35-61. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Zaragoza.
- Mariotti, R., A. Belaj, R. de la Rosa, L. León, F. Brizioli, L. Baldoni y S. Mousavi (2020). EST-SNP study of *Olea europaea* L. uncovers functional polymorphisms between cultivated and wild olives. *Genes*, 11: 916.
- Megino y Metauten, A. D. (1804). *El aceite*. Biblioteca del Banco de España. Venecia. 258 pp.
- Miazzi, M. M., V. di Rienzo, I. Mascio, C. Montemurro, S. Sion, W. Sabetta, G. A. Vivaldi, S. Camposeo, F. Caponio, G. Squeo y cols. (2020). Ger. O. P.: An integrated project for the recovery of ancient and rare olive germplasm. *Frontiers in Plant Science*, 11: 73.
- Michelakis, N. (2002). Monumental olive trees in the world, Greece and Crete. En N. Michelakis (ed.), *Olive and Oil in Crete*: 32-43. Association of Olive Municipalities of Crete. Sitía, Creta.
- Mousavi, S., R. Mariotti, L. Regni, L. Nasini, M. Bufacchi, S. Pandolfi, L. Baldoni y P. Proietti (2017). The first molecular identification of an olive collection applying standard simple sequence repeats and novel expressed sequence tag markers. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1283.
- Ninot, A., W. Howad, M. J. Aranzana, R. Senar, A. Romero, R. Mariotti, L. Baldoni y A. Belaj (2018). Survey of over 4,500 monumental olive trees preserved on-farm in the northeast Iberian Peninsula, their genotyping and characterization. *Sci. Hortic.*, 231: 253-264.
- Ortega Nieto, J. M. (1958). Intensificación y mejora de la producción del olivo en España. *Boletín del Instituto de Estudios Giennenses*, 18: 83-106. Jaén.
- Pannelli, G., S. Pandolfi, L. Baldoni y G. Bongi (2009). Selezione e valorizzazione di olivi antichi in Umbria. En *Proceedings of the IV Convegno Nazionale Piante Mediterranee – Le Potenzialita' del Territorio e dell'Ambiente: Raccolta degli Atti*: 93-104. Nova Siri Marina, Matera, 7-10 de octubre de 2009.
- Pascual Guillén, M. (1988). Las condiciones climáticas de las comarcas de Teruel y su influencia en el cultivo del olivo. *Teruel*, 79: 167-184.

- Peakall, R., y P. E. Smouse (2006). GenAIEx 6: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. *Mol. Ecol. Notes*, 6: 288-295.
- Peakall, R., y P. E. Smouse (2012). GenAIEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research –An update. *Bioinformatics*, 28: 2537-2539.
- Petrucelli, R., C. Giordano, M. C. Salvatici, L. Capozzoli, L. Ciaccheri, M. Pazzini, O. Lain, R. Testolin y A. Cimato (2014). Observation of eight ancient olive trees (*Olea europaea* L.) growing in the Garden of Gethsemane. *Comptes Rendus Biol.*, 337: 311-317.
- Petrucelli, R., C. Giordano, M. C. Salvatici, D. Beghè, M. Rodolfi, A. Fabbri y C. Benelli (2021). Characterization and conservation of “Olivo della Strega”: An ancient olive tree, precious resource for natural and cultural heritage. *Rend. Lincei. Sci. Fis. e Nat.*, 32: 311-324.
- Priego Jaramillo, J. M. (1930). *Las variedades del olivo en Aragón y La Rioja*. Instituto de Investigaciones Agronómicas. Ministerio de Fomento. Servicio de Publicaciones Agrícolas. Madrid. 48 pp.
- Puyuelo Arilla, J. M. (2009). *Estudio morfológico del fruto de ocho variedades de olivo*. Programa de doctorado 5000-1. Universidad de Zaragoza. 247 pp.
- Rallo Romero, L. (2005). *Variedades de olivo en España*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla. 496 pp.
- Rey Giménez, R., S. Vázquez Ayala, D. Laya Reig y A. C. Sánchez-Gimeno (2023). Chemometric and physico-chemical characterization of fruit and olive oils from autochthonous cultivars grown in Aragon (Spain). *Foods*, 12: 803.
- Romero Aroca, A., J. Plana Baliarda y J. Tous Martí (1993). Selección clonal de la población de olivos “Arbequina”. *Agric. Rev. Agropecu. Ganad.*, 730: 413-416.
- Rosa, R. de la, C. M. James y K. R. Tobutt (2002). Isolation and characterization of polymorphic microsatellites in olive (*Olea europaea* L.) and their transferability to other genera in the Oleaceae. *Mol. Ecol. Notes*, 2: 265-267.
- Rotondi, A., A. Fabbri, T. Ganino, D. Beghè, M. Magli y L. Morrone (2021). Genetic and landscape characterization of ancient crops: The olive tree, a case study in northern Italy. En L. Mueller, V. G. Sychev, N. M. Dronin y F. Eulenstein (eds.), *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*: 457-477. Springer International Publishing. Cham.
- Sánchez-Martínez, J. D., y A. Garrido-Almonacid (2017). Sobre la diversidad del olivar andaluz: del territorio al paisaje (el caso de la provincia de Jaén). *Estud. Geográficos*, 78: 523-551.
- Schicchi, R., C. Speciale, F. Amato, G. Bazan, G. Di Noto, P. Marino, P. Ricciardo y A. Geraci (2021). The monumental olive trees as biocultural heritage of Mediterranean landscapes: The case study of Sicily. *Sustainability*, 13: 6767.
- Serreta Oliván, A., R. Sancho Cohen, A. C. Sánchez Gimeno, P. Martín Ramos, J. A. Cuchí Oterino y J. Casanova Gascón (2023). Traditional olive tree varieties in Alto Aragón (NE Spain): Molecular characterization, single-varietal oils, and monumental trees. *Agriculture*, 13: 2204 <<https://doi.org/10.3390/agriculture13122204>>.

- Trujillo, I., M. A. Ojeda, N. M. Urdiroz, D. Potter, D. Barranco, L. Rallo y C. M. Díez (2013). Identificación del Banco Mundial de Germoplasma de Olivo de Córdoba (España) mediante SSR y marcadores morfológicos. *Árbol Genet. Genomas*, 10: 141-155.
- Uceda Ojeda, M., y M. Hernández Fernández (2017). La calidad del aceite de oliva. En D. Barranco Navero, R. Fernández Escobar y L. Rallo Romero (eds.), *El cultivo del olivo*: 839-868. Mundi Prensa. Madrid.
- Valeri, M. C., D. Mifsud, C. Sammut, S. Pandolfi, E. Lilli, M. Bufacchi, V. Stanzione, V. Passeri, L. Baldoni, R. Mariotti y cols. (2022). Exploring olive genetic diversity in the Maltese islands. *Sustainability*, 14: 10684.
- Veloso, M. M., M. C. Simões-Costa, L. C. Carneiro, J. B. Guimarães, C. Mateus, P. Fevereço y C. Pinto-Ricardo (2018). Olive tree (*Olea europaea* L.) diversity in traditional small farms of Ficalho, Portugal. *Diversity*, 10: 5.
- Viñuales Andreu, J. (2007). *Las variedades de olivo del Somontano*. Área de Desarrollo de la Diputación Provincial de Huesca / IEA. Huesca.
- Viñuales Andreu, J., y J. M. González (2008). El olivo de la Hoya a estudio. *Hoya Actual*, 19: 22-23.
- Yazbeck, E. B., G. Abi Rizk, A. Battistini, G. Hassoun, L. Geagea y F. Veronesi (2018). Molecular characterization of ancient olive trees in Bshaaleh Lebanon. *Int. J. Plant Anim. Environ. Sci.*, 8: 19-29.
- Zorrilla Alcaine, F. (1996). *Árboles singulares del Bajo Aragón*. Mira. Zaragoza. 212 pp.