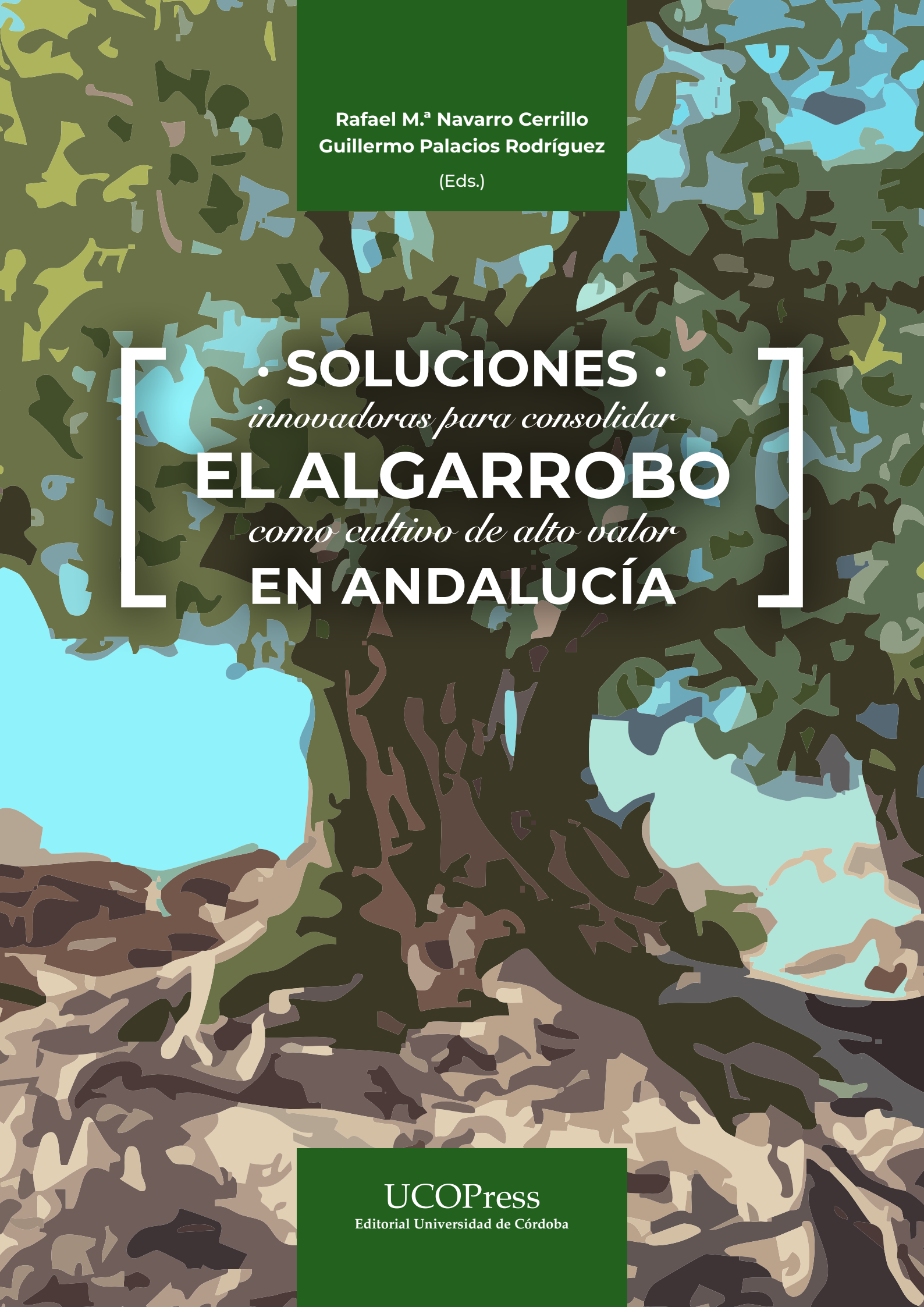




Rafael M.^a Navarro Cerrillo
Guillermo Palacios Rodríguez
(Eds.)

• SOLUCIONES •
innovadoras para consolidar
EL ALGARROBO
como cultivo de alto valor
EN ANDALUCÍA

UCOPress
Editorial Universidad de Córdoba

• **SOLUCIONES** •
innovadoras para consolidar
EL ALGARROBO
como cultivo de alto valor
EN ANDALUCÍA

• **SOLUCIONES** •
innovadoras para consolidar
EL ALGARROBO
como cultivo de alto valor
EN ANDALUCÍA

Rafael M.^a Navarro Cerrillo
Guillermo Palacios Rodríguez
(Eds.)

UCOPress
Editorial Universidad de Córdoba

Soluciones innovadoras para consolidar el algarrobo como cultivo de alto valor en Andalucía.—
Córdoba: UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba, 2026

21 x 29,7 cm, 168 pp., il. color

THEMA: T, TV, TVR

© Rafael M.^a Navarro Cerrillo, Guillermo Palacios Rodríguez (Eds.)

© Edita: UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba, 2026

Campus Universitario de Rabanales

Ctra. Nacional IV, Km 396. 14071 Córdoba (España)

Tel.: (+34) 957 218 126

<https://ucopress.uco.es/> • ucopress@uco.es

ISBN: 978-84-9927-948-0

eISBN: 978-84-9927-949-7

DOI: <https://doi.org/10.21071/000069>

Depósito Legal: CO 200-2026



Esta editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional.

Impresión: Avicam Ediciones. Tel. 687 720 302

Impreso en papel ecológico



Esta publicación se encuentra bajo una licencia internacional Creative Commons BY-NC-SA 4.0. Puede copiar, distribuir, adaptar y crear obras derivadas de este contenido, siempre y cuando le atribuya la autoría original y no utilice esta obra con fines comerciales. Las obras derivadas también deben estar bajo una licencia similar.

Índice

Prólogo	9
1. Biología y ecología del algarrobo	11
1.1. Descripción botánica y biología reproductiva	13
1.2. Distribución y ecología	18
Bibliografía	22
2. Bases genéticas	25
2.1. Introducción	27
2.2. Variación intraespecífica del algarrobo	28
2.3. Diversidad genética y estructura de poblaciones españolas	32
2.4. Regulación genética de la determinación sexual	34
2.5. Genómica	35
2.6. Conclusiones y perspectivas	37
Bibliografía	39
3. Conservación de recursos genéticos de algarrobo en Andalucía	43
3.1. Introducción	45
3.2. Antecedentes	46
3.3. Programa de conservación de recursos genéticos en Andalucía	47
3.4. Catalogación de los cultivares tradicionales de algarrobo de Andalucía	60
3.5. Acciones de difusión y relación con otras iniciativas	60
Bibliografía	62
4. El cultivo de plantas de algarrobo de alta calidad funcional.	65
4.1. Introducción	67
4.2. Obtención de frutos y semillas y germinación	68
4.3. Producción de plantas	70
Bibliografía	86

5. Plantaciones de algarrobo en Andalucía	89
5.1. Introducción	91
5.2. Antecedentes	93
5.3. Recomendaciones generales para las plantaciones de algarrobo	95
5.4. Modelos de restauración del algarrobo	96
5.5. Modelos de producción	98
5.6. Modelos de restauración	123
Bibliografía	143
6. Secuestro de carbono en plantaciones de algarrobo	145
6.1. Introducción	147
6.2. El programa de forestación de la UE en Andalucía: potencial de secuestro de carbono	150
6.3. Secuestro de carbono en plantaciones de algarrobo	152
6.4. Las plantaciones de algarrobo y su potencial de secuestro de carbono: una oportunidad para la especie	156
Bibliografía	158
Agradecimientos	161
Autores	163

Prólogo

El algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.) ha acompañado a las sociedades mediterráneas durante siglos, ocupando un lugar protagonista en muchos de nuestros paisajes culturales. Árbol austero, resistente y longevo, ha sabido adaptarse a condiciones difíciles, arraigando en suelos pobres, soportando la sequía y ofreciendo, generación tras generación, recursos valiosos para la alimentación humana y animal, la industria y el paisaje. Sin embargo, durante buena parte del último siglo, su importancia económica y ecológica quedó relegada a un segundo plano, víctima de cambios productivos, del abandono rural y de modelos agrarios poco compatibles con los ritmos del medio mediterráneo.

Hoy, en un contexto marcado por el cambio climático, la escasez de agua, la necesidad de diversificar los sistemas productivos y de reforzar la resiliencia de los territorios rurales, el algarrobo vuelve a situarse en el centro del debate. Este libro nace precisamente de la convicción de que las especies tradicionales, bien conocidas por generaciones pasadas, pueden ofrecer respuestas innovadoras a los desafíos actuales si se analizan con rigor científico y se gestionan con una visión renovada.

La obra que el lector tiene entre sus manos aborda el algarrobo desde una perspectiva amplia e integradora. A lo largo de sus capítulos se combinan el conocimiento botánico y ecológico de la especie, su distribución y adaptación al medio andaluz, los avances en mejora genética y técnicas de cultivo, así como las posibilidades de valorización de sus productos —desde la algarroba y el garrofín hasta sus derivados industriales— en mercados cada vez más exigentes y globalizados. Todo ello se presenta con un equilibrio deliberado entre precisión científica y aplicabilidad práctica, con el objetivo de resultar útil tanto a investigadores y técnicos como a agricultores, gestores y responsables de políticas agrarias y forestales. Especial atención merece el papel del algarrobo como cultivo estratégico dentro de los mosaicos agroforestales propios de la cuenca del Mediterráneo. Su capacidad para integrarse en paisajes agrarios y forestales, contribuir a la conservación del suelo,

favorecer la biodiversidad y generar rentas complementarias, como la capacidad de secuestro de C, convierte al algarrobo en una especie clave para la revitalización de áreas rurales. Lejos de ser un vestigio del pasado, el algarrobo se revela aquí como una oportunidad de futuro.

Este libro es también el resultado de un esfuerzo colectivo. Detrás de cada dato, cada ensayo de campo y cada reflexión hay años de trabajo, colaboración entre disciplinas y compromiso con los agricultores, que como garantes del territorio, han sabido conservar esta riqueza cultural y productiva. Es un ejemplo de cómo la investigación, cuando se conecta con las necesidades reales del medio rural, puede convertirse en una herramienta de transformación.

Con esta obra se invita al lector no solo a conocer mejor el algarrobo, sino a mirarlo de otra manera: como un aliado frente a la incertidumbre climática, como un recurso infrautilizado con un enorme potencial y como parte esencial del patrimonio natural y cultural mediterráneo. Los autores esperamos que estas páginas sirvan para estimular nuevas iniciativas, fomentar el diálogo entre ciencia y práctica, y contribuir a que el algarrobo ocupe el lugar que merece en el presente y el futuro de nuestros paisajes.

1. Biología y ecología del algarrobo

**Guillermo Palacios Rodríguez
Antonio Ángel García Mayoral
Juan Ortega Roperó
Mohamad Ali El Chami
Rafael M.^a Navarro Cerrillo**

1.1. Descripción botánica y biología reproductiva

El algarrobo (*Ceratonia siliqua* Linnaeus, 1953), especie leguminosa de la familia *Fabaceae*, es un árbol perenne de hasta 10 m de alto, aunque su altura media es de 5-6 m, de tronco ensanchado y nudoso en la base y de corteza casi lisa de color grisáceo (Fig. 1.1). Se ramifica en una copa muy densa, frondosa y globosa, siempre verde y exuberante. Las ramas principales adoptan un porte casi horizontal en una longitud de hasta 6 m. Las ramas secundarias son casi erectas en la parte superior de la copa, mientras que son inclinadas o péndulas en la zona periférica (Ramón-Laca y Mabberley, 2004; Ruiz de la Torre, 2006; Thomas *et al.*, 2024).

El sistema radical es muy largo y penetrante, robusto, tortuoso, con muchas raíces laterales que adquieren gran desarrollo y que se alargan más allá de la proyección de la copa. Alcanzan más de 20 metros de longitud formando, así, una masa de raíces que llega incluso a los estratos más profundos del suelo. Penetran en el suelo serpenteado entre las fisuras de las rocas, buscando agua y elementos nutritivos y creando un adecuado anclaje de la planta contra el viento. A veces afloran, en parte, a la superficie. En terrenos calizos fisurados contribuyen, junto con el agua de lluvia y la alternancia de bajas y altas temperaturas, a la formación de suelo fértil.



Figura 1.1. Aspecto general del árbol y detalle de la corteza.

Las hojas tienen entre 4 y 24 cm de largo y están compuestas por entre 1 y 5 pares de folíolos elípticos o suborbiculares de 3-7 cm de largo por 3-6 cm de ancho. Los folíolos son coriáceos, con el borde entero, de color verde oscuro, lustrosos por el haz y de un verde más pálido por la cara inferior (Ruiz de la Torre, 2006, Fig. 1.2).



Figura 1.2. Hoja de algarrobo con 8 folíolos y hojas en la copa.

Se sitúan sobre un raquis de 12-24 mm de largo, coriáceo, persistente, brillante y de color verde intenso, más claro por el envés y con un alto contenido de taninos. Las hojas se insertan en las ramas mediante un pecíolo de unos 3 cm, que presenta un engrosamiento carnoso en el punto de inserción de hasta 0,5 mm. Las estípulas son muy pequeñas y caducas.

El algarrobo brota y renueva sus hojas en abril a mayo. Las hojas persisten unos 15-18 meses (Diamantoglou y Mitrakos, 1981). Así, suelen caer entre julio y septiembre del año siguiente, cuando adquieren un color pardo-rojizo (Ruiz de la Torre, 2006).

El algarrobo es una especie polígama dioica; esto es, algunos individuos tienen sólo flores masculinas, otros sólo femeninas, otros tienen flores masculinas y femeninas y otros flores masculinas y hermafroditas en la misma planta (Fig. 1.3, Fig. 1.4). Casi todos los cultivares son dioicos, aunque pueden encontrarse flores de cualquiera de los dos sexos con órganos poco desarrollados del sexo contrario (Catarino, 1993).

La inflorescencia está formada por racimos multifloros patentes o erectopatentes, solitarios o agregados, de 1,3 a 9 (13,5) cm de largo. Las flores masculinas se reúnen en número de (7)18-53, las femeninas de (11)35-57(117) y las hermafroditas de 16 a 39 (Ortiz, 1999). Estas inflorescencias se insertan sobre nudos de ramas adultas, generalmente sin hojas, a veces también sobre gruesas ramas muy viejas. Los nudos pueden ir engrosando por las sucesivas fructificaciones que van teniendo lugar a lo largo de los años.

Las flores están completamente privadas de corola; presentan un cáliz en forma de copa que sobrepasa un receptáculo carnoso de color verdoso. Las flores femeninas tienen un pistilo de aproximadamente 1 cm, color verdoso, de forma alargada, ligeramente surcado en la sutura dorsal y cubierto por una leve pilosidad blanca brillante. El estilo termina en un estigma sentado esponjoso, de color verde claro o amarillento en la fecundación y negro tras la misma. Las inflorescencias femeninas son, al principio, rojo carmín oscuro y luego se tornan de color verdoso amarillento. Las flores masculinas, más pequeñas que las femeninas, están constituidas por un receptáculo en forma de disco sobre el que se insertan horizontalmente de 5 a 7 estambres dispuestos en corona. Las anteras son de color rojo o amarillo; por ello, comúnmente, a las plantas masculinas se las clasifica en dos tipos “machos amarillos” y “machos rojos” (Batlle y Tous, 1997). Los primeros, con flores que en plena antesis tienen un colorido amarillo limón característico y que se reúnen en inflorescencias más largas que las de tipo “rojo”, tienen un desarrollo rápido y vigoroso y resisten mejor los vientos fríos. Las plantas del tipo “macho rojo”, con anteras de color rojo,

son de menor desarrollo, floración más abundante, pero con flores más delicadas con respecto a la acción del frío y el viento. El polen es de color amarillo claro. Las flores hermafroditas contienen estambres y pistilos completamente desarrollados como en las flores unisexuales normales.

El algarrobo florece a partir de julio hasta finales de noviembre, pudiendo prolongarse hasta enero (Arroyo, 1988 y 1990; Ortiz *et al.*, 1995; Ortiz *et al.*, 1999; Ruiz de la Torre, 2006). El periodo de floración presenta una gran variabilidad y está determinado por factores genéticos y ambientales (Tous y Batlle, 1990; Retana *et al.*, 1994; Bosch *et al.*, 1996). La polinización es entomófila y anemófila. Las flores segregan sustancias azucaradas y emiten un olor característico penetrante. Custódio *et al.* (2004) identificaron numerosos compuestos volátiles en las flores, entre los que dominan el óxido de linalool y el trans-linalool. A diferencia de la mayoría de las especies con polinización entomófila, el periodo de floración otoñal de este árbol mediterráneo no es la época más adecuada para la acción de insectos polinizadores (Retana *et al.*, 1994). Sin embargo, el algarrobo parece solventar, en parte, este inconveniente generando un gran número de flores y aprovechando diferentes especies de insectos (moscas, abejas, polillas, etc.) (Retana *et al.*, 1990). El atípico comportamiento reproductor de este árbol se traduce, a menudo, en una elevada proporción de frutos desprendidos antes de alcanzar la madurez como resultado de una limitada polinización y, en consecuencia, en un reducido porcentaje de frutos maduros (Bosch *et al.*, 1996). Además de esta limitación causada por la escasez de vectores de polinización, ha de tenerse en cuenta que la producción de frutos depende, también, de las condiciones climáticas, del contenido de nutrientes y de la constitución del suelo, así como de la proporción de pies masculinos en la población o plantación.

El fruto comienza a desarrollarse en primavera, tras la fecundación, para completar su desarrollo y maduración en agosto-septiembre del año siguiente, momento en que también se produce el aborto de los frutos no viables (Bosch *et al.*, 1996). La maduración del fruto tarda, por tanto, algo más de un año. Así, en la época de cosecha, al permanecer las algarrobos durante largo tiempo sobre las plantas, el árbol ya ha florecido para dar lugar a la siguiente fructificación. La coincidencia del periodo de maduración y de floración provoca una competencia por el uso de los recursos, lo que se relaciona con la vecería característica de los algarrobos (cada dos años).



Figura 1.3. Flores femeninas (izqda.) y flores masculinas (dcha.): inicio de la floración (arriba); cuaje (abajo) (fuente: Trabajos exploratorios GO-QUERAT).



Figura 1.4. Flores hermafroditas

El fruto es una legumbre indehisciente, llamada lomento o más comúnmente algarroba o garrofa, de 4,5-23 cm de largo y 1-3 cm de ancho. Es coriáceo, de contorno linear-elíptico, engrosado en los bordes, de caras planas, verde primero y de color castaño oscuro en la madurez (Fig. 1.5). La fructificación del algarrobo se produce cuando se superan las 5.000-6.000 horas acumuladas de temperatura sobre 9-10 °C (Batlle y Tous, 1997).



Figura 1.5. Frutos en desarrollo, de color típicamente verde (izqda.) y frutos maduros, de tono pardo-rojizo (dcha.).

Las semillas o garrofines son de forma plana-aovadas (lenticulares), con un tamaño de 8-10 mm por 6-7,5 mm, de color pardo rojizo lustroso, provistas de una testa gruesa e impermeable (Ortiz *et al.*, 1999; Ruiz de la Torre, 2006) (Fig. 1.6). La cubierta es muy dura, el embrión y los cotiledones son aplanados de un color claro, mientras que el endospermo es duro, abundante, blanco sucio y rico en sustancias gomosas (Avallone *et al.*, 1997; Bengoechea *et al.*, 2008). El embrión, de muy pequeño tamaño, presenta una posición apical en la semilla, con la radícula orientada hacia el ápice (Shepperd, 2008). Cada fruto contiene de 5(10) a 17 semillas y pesa de 25 a 40 g, teniendo las semillas un peso constante. Los dos componentes principales de la legumbre de algarrobo son la pulpa y la semilla, aunque la proporción en peso de cada uno de ellos es muy variable en función de la variedad (ver Cap. 2). La composición química del fruto ha sido descrita para poblaciones mediterráneas (Ahmet *et al.*, 2007).



Figura 1.6. Semillas de algarrobo.

El duro tegumento de las semillas impide la imbibición de agua, por lo que la germinación es muy lenta y dilatada en el tiempo. Cuando el tegumento se rompe, la semilla absorbe agua con bastante rapidez, facilitándose la germinación. El tegumento

favorece la longevidad de las semillas siempre que éste se mantenga intacto, habiéndose constatado que con 4 años aún mantienen una viabilidad semejante a las semillas recién recolectadas (Ortiz *et al.*, 1995). Por consiguiente, la persistencia del banco de semillas en el suelo puede ser una estrategia reproductiva importante en el caso del algarrobo.

Algunos rasgos de los frutos indican adaptación a la dispersión por mamíferos: gran tamaño, algo carnosos, semillas duras y resistentes a la masticación y digestión, que no afecta a la viabilidad de las semillas (Ortiz *et al.*, 1995), observándose una tasa de germinación similar a las no consumidas. La cubierta puede, así, favorecer la dispersión a larga distancia por medio de los mamíferos, que consumen el fruto, pero que no destruyen las semillas. Muchos de estos consumidores expulsan las semillas previamente a la digestión, en contra de lo que se cree normalmente. Posiblemente los pequeños mamíferos, como el zorro (*Vulpes vulpes*), son los vectores más adecuados de dispersión a larga distancia que los grandes mamíferos herbívoros, dado que en cada ingesta digieren menos semillas, pero éstas aparecen en un porcentaje mayor en las deposiciones. Las semillas de algarrobo parecen estar, también, adaptadas al fuego. El embrión no se ve afectado por las altas temperaturas; de hecho, si la temperatura alcanzada es muy alta, se incrementa la dureza e impermeabilidad de la cutícula, lo que sugiere una posible adaptación a las condiciones posteriores a un incendio, de modo que se demora la germinación hasta que mejoran las condiciones ambientales (Ortiz *et al.*, 1995).

El algarrobo se reproduce fácilmente por semillas y brota de forma vigorosa de cepa y raíz, soportando bien el recorte, características que lo adaptan muy bien al clima mediterráneo. En la figura 1.7 se puede observar la alta capacidad de rebrote ante la pérdida de copa a pesar de lo longevo del ejemplar.



Figura 1.7. Ejemplar monumental de *Ceratonia siliqua* en Loma de los Escalones (Córdoba).

1.2. Distribución y ecología

El algarrobo presenta una distribución general en todos los países de la cuenca del Mediterráneo: Portugal, España, Marruecos, Francia, Italia, Argelia, Túnez, Libia, Croacia, Grecia, Turquía, Siria, Líbano, Israel y Egipto, entre 27° y 42° de latitud norte; en condiciones favorables puede superar los 44°, como en la costa de Liguria (Talhouk *et al.*, 2004; Ramón-Laca y Mabberley, 2004; Barracosa *et al.*, 2007; Naghmouchin *et al.*, 2009; Mahmoud *et al.*, 2009) (Fig. 1.8).

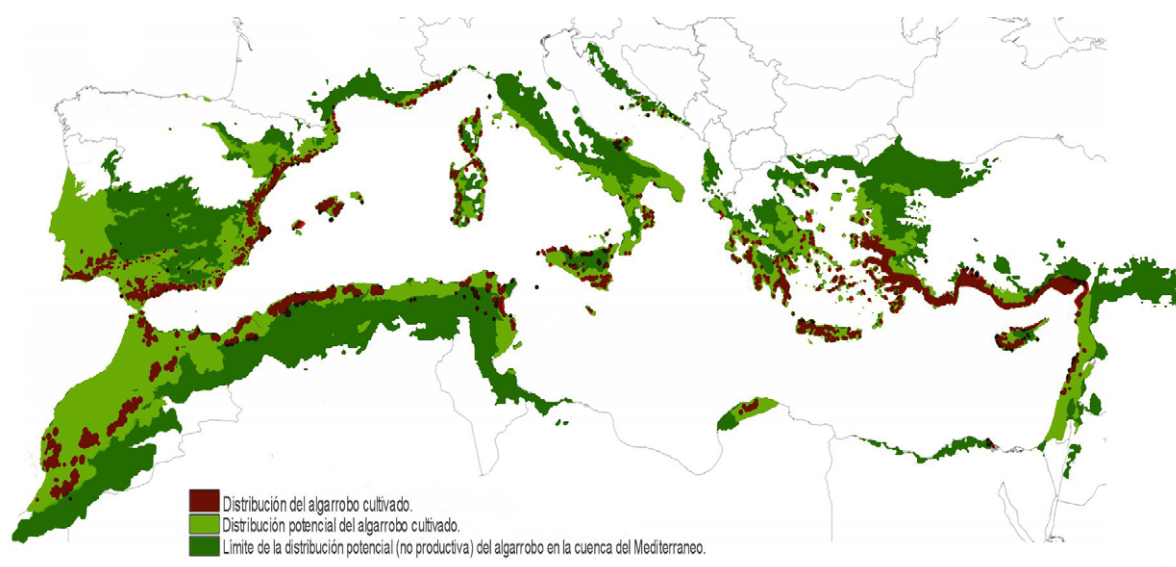


Figura 1.8. Distribución del algarrobo en la cuenca mediterránea. Elaboración propia a partir de diferentes bases de datos.

Es extremadamente difícil establecer el área de origen del algarrobo, aunque se considera que procede de la zona mediterránea (Hillcoat *et al.*, 1980). Formaciones extensas de algarrobo silvestre sólo aparecen actualmente en Anatolia meridional, Siria, Líbano, Israel y la Cirenaica septentrional (Spina, 1989; Martins-Loução, 1990). Artificialmente se encuentra en zonas de clima mediterráneo de Estados Unidos (California y Texas), de México y de Chile.

En la Península Ibérica (Fig. 1.9) se encuentra en las provincias costeras desde Cataluña hasta Andalucía (Fig. 1.10) y es cultivado, sobre todo, en Cataluña, Región Valenciana, Islas Baleares y el Algarve. Por ser una planta cultivada desde antiguo es difícil precisar sus límites naturales, aunque se duda que sea autóctona de la Península Ibérica (Ruiz de la Torre, 2006).

El área de distribución de la especie coincide con su asociación con el acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris*) y el palmito (*Chamaerops humilis*), donde aparece junto a plantas de hoja perenne xerófitas como la encina (*Quercus ilex*), el labiérnago (*Phillyrea angustifolia*), el mirto (*Myrtus communis*), la cornicabra (*Pistacia terebinthus*) o el lentisco (*Pistacia lentiscus*) y, en menor medida, con especies como el alcornoque (*Quercus suber*).

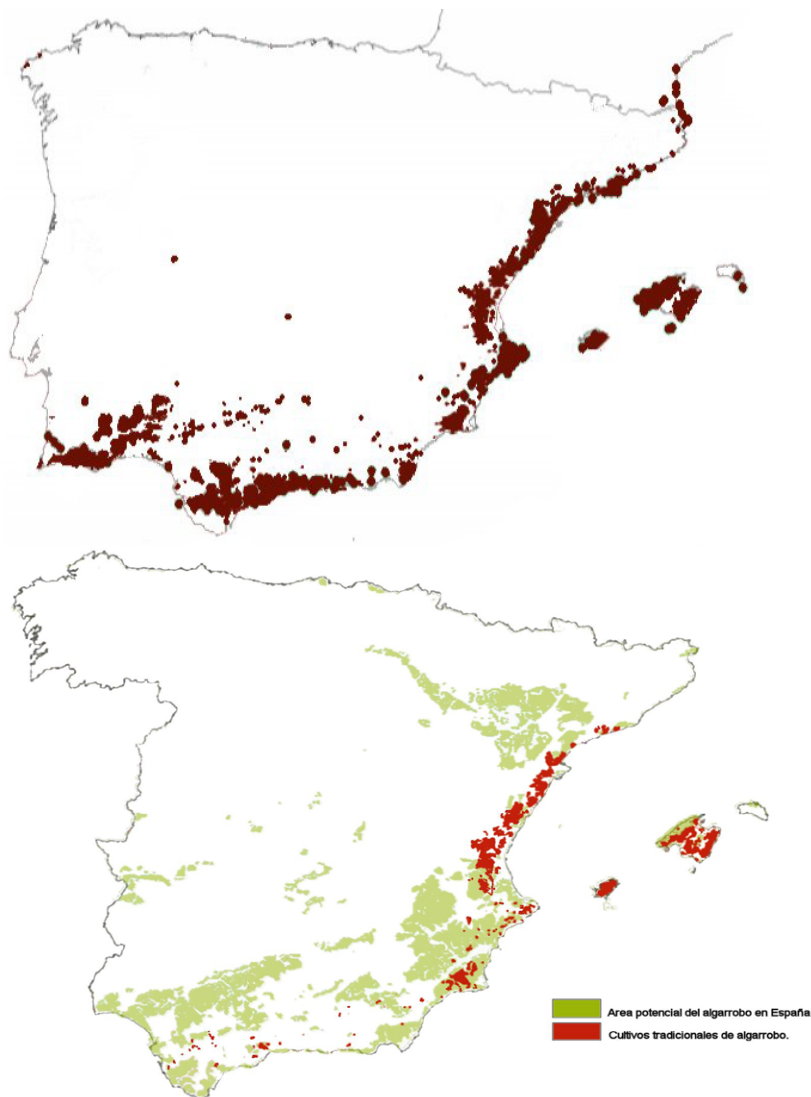


Figura 1.9. Distribución del algarrobo en la Península Ibérica (arriba) y distribución potencial y de cultivares en España (abajo). Elaboración propia a partir de diferentes bases de datos.

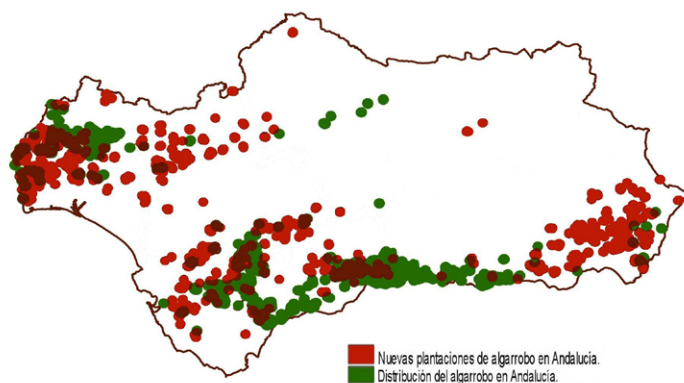


Figura 1.10. Distribución de algarrobo en Andalucía (REDIAM, 2020) y nuevas superficies de cultivo (expedientes de forestación con *C. siliqua*). Elaboración propia a partir de diferentes bases de datos.

Uno de los factores fundamentales en su distribución es la temperatura. Es una especie que vegeta y fructifica bien en las regiones donde la temperatura media invernal se sitúa en torno a 10 °C y la temperatura media estival no es inferior a 20 °C durante, al menos, cuatro meses al año y con un régimen térmico moderado (López González, 1995; Ruiz de la Torre, 2006). Es muy sensible a las heladas y a

las bajas temperaturas, pudiéndose considerar una especie termohigrófila, con requerimientos térmicos parecidos al naranjo. No tolera temperaturas inferiores a 0 °C (-4 °C), aunque las plantas jóvenes pueden verse dañadas por debajo de 4 °C. Durante el período estival, los individuos adultos soportan más de 40 °C sin estrés aparente. Así, el algarrobo habita en climas mediterráneos típicos (fitoclimas IV₂ y, en menor medida, IV₃ y IV₄).

Las lluvias de otoño e invierno son importantes para el buen desarrollo del algarrobo, aunque se adapta a una pluviometría anual de 250-300 mm (Batlle y Tous, 1997; Ruiz de la Torre, 2006), siendo recomendable su establecimiento en zonas con precipitaciones superiores a los 500-550 mm o con opciones de riego.

Desde el punto de vista anatómico, las hojas presentan adaptaciones a la xericidad por su carácter coriáceo y por estar cubiertas por una cutícula gruesa, lo que limita las pérdidas de agua (Correia *et al.*, 2001). Es capaz de sobrevivir a largos periodos sin lluvia y tolerar altas radiaciones, en particular los individuos adultos. Por otra parte, se ha estimado una correlación negativa entre el contenido hídrico del suelo y la capacidad de absorción de agua proveniente del rocío en el algarrobo. En condiciones de menor disponibilidad edáfica, la especie incrementa la captación de esta fuente atmosférica; no obstante, el volumen absorbido resulta insuficiente para compensar las pérdidas diarias por transpiración. Esta descompensación se explica por la limitada capacidad del algarrobo para reducir su conductancia estomática frente a situaciones de déficit hídrico, lo que evidencia una estrategia fisiológica orientada a priorizar el mantenimiento de la asimilación fotosintética, aun a costa de una mayor pérdida de agua (Lo Gullo y Salleo, 1988; Correia y Martins-Loução, 1990, 1995; Correia *et al.*, 2001).

Es una especie de temperamento robusto, aunque algo delicado en las primeras edades y de crecimiento relativamente lento en condiciones naturales, pero alcanzando una gran longevidad.

Vegeta bien en llanuras y laderas suaves, pero también se la puede encontrar en áreas de montaña baja sobre laderas abruptas, como por ejemplo en los montes de Málaga. La altitud óptima para la especie es entre 0-500 m, aunque en Andalucía puede llegar a los 900 o 1.000 m, lo que depende de la latitud, la pendiente y la exposición. En las laderas orientadas al sur crece más exuberante y produce una mayor cantidad y calidad de frutos (López González, 1995; Ruiz de la Torre, 2006).

Los algarrobos aparecen generalmente sobre suelos calizos superficiales, incluso rocosos, en cuyas hendiduras profundizan las raíces, donde son capaces de vegetar e incluso fructificar. No obstante, esta especie se comporta como indiferente edáfica y, aunque prefiere los suelos calizos de textura arenosa o franco-arenosa que tienen un buen contenido en calcio y potasio, se adapta a terrenos arenosos, a los moderadamente ácidos y a los pedregosos. Por el contrario, no tolera los suelos mal drenados o los arcillosos, aunque parece ser tolerante a la salinidad (Winer, 1980). La rusticidad y modestas exigencias de esta planta permiten aprovechar terrenos en los cuales no hay otra alternativa válida.

La interacción del algarrobo con otros organismos del componente biológico del suelo no ha sido muy estudiada y, a pesar de ser una leguminosa, no puede fijar nitrógeno (Martins-Loução *et al.*, 1996). Es una especie muy consumida por la fauna silvestre, en particular sus frutos, como se ha indicado anteriormente, pero

también son palatables sus hojas jóvenes, rebrotando con facilidad, creando interesantes relaciones ecológicas que enriquecen los ecosistemas mediterráneos donde se presenta.

El largo proceso histórico de domesticación de la especie ha conducido a la selección de diferentes cultivares, habiéndose mencionado más de 50 en todo el mundo (Sebastián y McComb, 1986; Tous y Batlle, 1990). Los cultivares de algarrobo presentan una gran variación en sus características morfológicas, agronómicas y tecnológicas, aunque presentan una escasa diferenciación genética con los individuos naturalizados (Tous y Batlle, 1990; Russo y Polignamo, 1996; Batlle *et al.*, 1996, Barracosa *et al.*, 2008).

Los criterios de selección tradicionales han sido el tamaño de la algarroba, el contenido de pulpa y azúcares, y la producción de semilla (Fig. 1.11). Andalucía se ha mostrado como un área importante para la prospección y recolección de fenotipos interesantes (Tous *et al.*, 1993; Batlle y Tous, 1997). Se ha descrito el tamaño del genoma de la especie, observándose la existencia de variación local, siendo el estrés hídrico el factor modelador de esa variabilidad (Buresi *et al.*, 2004; Makrem *et al.*, 2006).



Figura 1.11. Cultivar tradicional de gran producción de algarroba (Málaga)
(fuente: GO-QUERAT).

Bibliografía

- Ahmet Ayaz, F., Torun, H., Ayaz, S., Correia, P., Alaiz, M., Sanz, C., Grúz, J., Strnad, M. (2007). Determination of chemical composition of Anatolian carob pod (*Ceratonía siliqua* L.): sugars, amino and organic acids, minerals and phenolic compounds. *J. Food Qual.* 30, 1040–1055.
- Arroyo, J. (1988). Fenología de la floración en especies del matorral del Sur de España. *Lagascalía* 15, 593–606.
- Arroyo, J. (1990). Ritmos climáticos y de floración en matorrales del SW de España. *Lagascalía* 16(1), 25–50.
- Avallone, R., Plessi, M., Baraldi, M., & Monzani, A. (1997). Determination of chemical composition of carob (*Ceratonía siliqua*): protein, fat, carbohydrates, and tannins. *J. Food Compos. Anal.*, 10(2), 166–172.
- Barracosa, P., Lima, M., Cravador, A. (2008). Analysis of genetic diversity in Portuguese *Ceratonía siliqua* L. cultivars using RAPD and AFLP markers. *Sci. Hort.* 118(3), 189–199.
- Barracosa, P., Osorio, J., Cravador, A. (2007). Evaluation of fruit and seed diversity and characterization of carob (*Ceratonía siliqua* L.) cultivars in Algarve region. *Sci. Hort.* 114(4), 250–257.
- Battle, I., Tous, J. (1997). Carob tree. *Ceratonía siliqua* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Vol. 17. IPGRI-IPK, Rome.
- Bengoechea, C., Romero, A., Villanueva, A., Moreno, G., Alaiz, M., Millán, F., Guerrero, A., Puppo, M. (2008). Composition and structure of carob (*Ceratonía siliqua* L.) germ proteins. *Food Chem.* 107(2), 675–683.
- Bosch, J., García del Pino, F., Ramoneda, J., Retana, J. (1996). Fruiting phenology and fruit set of carob *Ceratonía siliqua* L. (Cesalpinoaceae). *Israel J. Plant Sci.* 44, 359–368.
- Buresi, P., Pavliaciek, T., Horovaa, L., Nevo, E. (2004). Microgeographic genome size differentiation of the Carob Tree, *Ceratonía siliqua*, at 'Evolution Canyon', Israel. *Ann. Bot.* 93, 529–535.
- Catarino, F. (1993). The Carob tree: anexemplary plant. *Naturopa* 73, 14–15.
- Correia, M.J., Coellho, D., David, M. (2001). Response to seasonal drought in three cultivars of *Ceratonía siliqua*: leaf growth and water relations. *Tree Physiol.* 21, 645–653.
- Correia, P., Martins-Loucao, M (1990). Effect of different water quantities on the vegetative growth of young carob-trees (*Ceratonía siliqua* L.). *Actas Hort.* 6, 412–417.
- Correia, P., Martins-Loucao, M (1995). Seasonal variations of leaf water potential and growth in fertigated carob-trees (*Ceratonía siliqua* L.). *Plant Soil* 172, 199–206.
- Custódio, L., Nogueira, J. M. F., Romano, A. (2004). Sex and developmental stage of carob flowers affects composition of volatiles. *J. Hort. Sci. Biotechnol.*, 79, 689–692.
- Diamantoglou, S., Motrakos, K. (1981). Leaf longevity in Mediterranean evergreen sclerophylls. En: Components of productivity of Mediterranean-climate regions. Basic and applied aspects. (Margaris N., Mooney H., eds.). Junk Publishers, The Hague. pp. 17–19.
- Hillcoat, D., Lewis, G., Verdcourt, B. (1980). A new species of *Ceratonía* (Leguminosae-Caesalpinioideae) from Arabia and the Somali Republic. *Kew Bull.*, 261–271.
- Lo Gullo, M., Salleo, S. (1988). Different strategies of drought resistance in three Mediterranean sclerophyllous trees growing in the same environmental conditions. *New Phytol.* 108, 267–276.
- López González, G. (1995). La guía INCAFO de los árboles y arbustos de la Península Ibérica. Ed. INCAFO, Madrid.
- Mahmoud Sidina, M., el Hansali, M., Wahid, N., Ouattmane, A., Boulli, A., Haddioui, A. (2009). Fruit and seed diversity of domesticated carob (*Ceratonía siliqua* L.) in Morocco. *Sci. Hort.* 123(1), 110–116.

- Makrem, A., Najeh, B. F., Laarbi, K. M., Mohamed, B. (2006). Genetic diversity in Tunisian *Ceratonía siliqua* L. (Caesalpinioideae) natural populations. *Genet. Res. Crop Evol.*, 53(7), 1501-1511.
- Martins-Loução, M., (1990). Carob (*Ceratonía siliqua* L.). *Biotechnol. Agric. For.* 10, 658-675.
- Martins-Loução, M., Correia, P., Pereira, F., (1996) The role of plant/soil microorganisms interactions in carob development. En: *Proceedings of the III International Carob Symposium*. Cabanas, Tavira, Portugal.
- Naghmouchi, S., Khouja, M., Romero, A., Tous, J., Boussaid, M., (2009). Tunisian carob (*Ceratonía siliqua* L.) populations: morphological variability of pods and kernel. *Sci.Hort.* 121(2), 125-130.
- Ortiz, P. L. (1999). *Ceratonía* L. En Talavera S., Aedo C., Castroviejo S., Romero Zarco C., Sáez L., Salgueiro F.J., Velayos M. (eds.) *Flora iberica* 7: 29-32. Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid.
- Ortiz, P., Arista, M., Talavera, S. (1995). Germination ecology of *Ceratonía siliqua* L. (Caesalpinaceae) in Mediterranean trees. *Flora* 190, 89-95.
- Ortiz, P. L., Arista, M., Talavera, S. (1999). Distance-independent fruit-set pattern in a dioecious population of *Ceratonía siliqua* (Caesalpinaceae). *Flora*, 194(3), 277-280.
- Ramón-Laca, I., Mabberley, D., (2004). The ecological status of the carob-tree (*Ceratonía siliqua*, Leguminosae) in the Mediterranean. *Bot. J. Linn. Soc.* 144, 431-436.
- REDIAM 2020. Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía. Junta de Andalucía, Sevilla.
- Retana, J., Ramoneda, J., García del Pino, F., (1990). Importancia de los insectos en la polinización del algarrobo. *Bol. San. Veg. Plagas* 16, 143-150.
- Retana, J., Ramoneda, J., García del Pino, F., Bosch, J. (1994). Flowering phenology of carob, *Ceratonía siliqua* L. (Caesalpinaceae). *J. Hort. Sci.* 69(1), 97-103.
- Ruiz de la Torre, J. (2006). *Flora Mayor. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Dirección General para la Biodiversidad*, Madrid, España. pp. 934-939.
- Russo, G., Polignano, G. B. (1996). Variation of seed and fruit characters in *Ceratonía siliqua* L. cultivars. *Genet Resour Crop Evol.* 43(6), 525-531.
- Sebastian, K. T., McComb, J. A. (1986). A micropropagation system for carob (*Ceratonía siliqua* L.). *Sci. Hortic.*, 28(1-2), 127-131.
- Shepperd, W.D. (2008)- *Ceratonía siliqua* L. En: *The woody plant seed manual* (Bonner F.T., Karrfalt R.P., eds.). United States Department of Agriculture, Forest Service, *Agriculture Handbook* 727, Washington. pp. 371-373.
- Spina, P. (1989). *El algarrobo*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Talhoun, S., van Breugel, P., Zurayk, R., Al-Khatib, A., Estephan, J., Ghalayini, A., Debian, N., Lychaa, D., (2004). Status and prospects for the conservation of remnant semi-natural carob *Ceratonía siliqua* L. populations in Lebanon. *For. Ecol. Manage.* 206(1-3), 49-59.
- Thomas, P. A., Garcia-Martí, X., Mukassabi, T. A., Tous, J. (2024). *International Biological Flora: Ceratonía siliqua*: No. 4. *J. Ecol.*, 112(8), 1885-1922.
- Tous, J., Batlle, I., (1990). *El algarrobo*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Tous, J., Batlle, I., Romero, A. (1993). *El algarrobo: orientaciones modernas para su cultivo*. *Fruticultura Profesional* 54, 82-87.
- Winer, N. (1980). The potential of the carob tree (*Ceratonía siliqua*). *Int. Tree Crops J.* 1, 15-26.

2. Bases genéticas

**Mohamad Ali El Chami
Guillermo Palacios-Rodríguez
Rafael M.^a Navarro-Cerrillo
Jesús V. Jorrín-Novo
María-Dolores Rey**

2.1 Introducción

El algarrobo es una especie forestal ampliamente cultivada en todo el mundo, conocida por su gran adaptabilidad al clima mediterráneo (Lossaint, 1973; Batlle y Tous, 1997). Actualmente, esta especie crece de forma silvestre, existiendo poblaciones naturales o seminaturales en el norte de África y el Mediterráneo oriental (Chipre, Israel, Líbano, y Turquía). En países mediterráneos de Europa occidental (España, Portugal e Italia) se cultiva en huertos y, por lo general, se propaga mediante injertos. España es uno de los mayores productores y exportadores de algarroba en el mundo (Tous *et al.*, 2013).

En los últimos 20 años, el número de publicaciones científicas que tienen como objeto esta especie ha aumentado considerablemente, especialmente en lo que respecta a sus aplicaciones industriales, beneficios para la salud y valor nutricional para el consumo humano (Martins-Loução *et al.*, 2024). Sin embargo, el conocimiento disponible sobre sus características genéticas y su evolución sigue siendo muy limitado.

Disponer de conocimientos sobre la diversidad genética de la especie es fundamental para orientar las acciones de conservación de sus recursos genéticos de manera que éstas sean eficientes. Sin embargo, uno de los retos subyacentes en las diferentes aproximaciones de caracterización de la variación genética del algarrobo es discriminar entre su historia evolutiva y el impacto que en ella podría haber tenido su amplio uso desde épocas antiguas. Por otra parte, la diversidad genética del algarrobo es un factor clave para abordar un programa de mejora genética, ya que es la base que permite efectuar selecciones para el desarrollo de nuevas variedades que sean superiores en caracteres de interés, como la productividad y la tolerancia a condiciones ambientales determinadas.

Este capítulo ofrece una visión actualizada sobre la genética del algarrobo, destacando los estudios centrados en la diversidad genética y la estructura poblacional mediante el uso de marcadores moleculares de DNA, así como el impacto de la domesticación sobre dicha diversidad. También se recogen los resultados de estudios relacionados con los mecanismos genéticos asociados a su sexualidad y se examinan los avances en genómica estructural y funcional, incluyendo la identificación de genes vinculados a la tolerancia a estrés abiótico, a la regulación de la floración y a la síntesis de compuestos secundarios de interés económico. Finalmente, el capítulo concluye con las perspectivas futuras para el estudio genético del algarrobo, enfocadas en el uso de herramientas biotecnológicas, como las técnicas ómicas de última generación y la edición genética, con el objetivo de optimizar la conservación de la especie, mejorar su adaptación al cambio climático y potenciar su aprovechamiento en sistemas agroforestales sostenibles.

2.2 Variación intraespecífica del algarrobo

Las características morfológicas de las vainas y semillas han sido la principal herramienta descriptiva para caracterizar las poblaciones silvestres y las colecciones de algarrobo (Marakis *et al.*, 1988; Batlle y Tous, 1997; Barracosa *et al.*, 2008; Sidina *et al.*, 2009; Haddarah *et al.*, 2013; El-Kahkahi *et al.*, 2014; Srecec *et al.*, 2016). Numerosos estudios han confirmado que el algarrobo muestra una alta variación en parámetros morfológicos en diferentes poblaciones, tanto españolas (Albanell *et al.*, 1991) como portuguesas (Barracosa *et al.*, 2008), marroquíes (Konaté *et al.*, 2007; El-Kahkahi *et al.*, 2014), tunecinas (Naghmouchi *et al.*, 2009) y libanesas (Haddarah *et al.*, 2013; Ali *et al.*, 2019). Las diferencias observadas en los rasgos morfométricos en estas poblaciones se atribuyeron a factores genéticos, dado que estas poblaciones se habrían propagado de manera natural a través de semillas.

Sin embargo, basarse únicamente en rasgos morfológicos para caracterizar los individuos es insuficiente para evaluar y distinguir genotipos de la misma especie (Warburton y Hoisington 2001). Al respecto, debe tenerse en cuenta que las características morfológicas pueden variar según el entorno (luz, temperatura, nutrientes, etc.), lo que puede ocultar o modificar la expresión del genotipo. Así, dos individuos con genotipos distintos pueden parecer iguales si están en condiciones similares. Por el contrario, la plasticidad fenotípica permite que un mismo genotipo se exprese de manera diferente según el ambiente. Además, algunas mutaciones o variantes genéticas pueden no ser manifiestas en un determinado momento, pero pueden tener implicaciones importantes con vistas a su selección (por ejemplo, en resistencia a enfermedades o en eficiencia metabólica).

2.2.1. Caracterización genética mediante marcadores moleculares

El uso de marcadores moleculares es la técnica dominante para estimar la diversidad genética y la variabilidad entre poblaciones y dentro de ellas, ya que estos marcadores son ilimitados y no se ven afectados por factores ambientales ni por la etapa de desarrollo de las plantas, como sí ocurre con los caracteres morfológicos (Govindaraj *et al.* 2015).

Las técnicas moleculares para este fin han evolucionado mucho en las últimas décadas; desde los métodos bioquímicos, como el de isoenzimas, hasta tecnologías modernas de secuenciación masiva. Actualmente, están disponibles múltiples técnicas para el análisis de la variación a nivel de DNA; la elección de una u otra dependerá del objetivo del estudio, del grado de precisión requerido y de los recursos disponibles.

La aplicación de estas técnicas para evaluar la diversidad genética en algarrobo (Tabla 2.1) se iniciaron utilizando las isoenzimas como marcadores en poblaciones cultivadas en España procedentes de España, Marruecos y Chipre (Tous *et al.*, 1992), en poblaciones naturales de Túnez (Makrem *et al.*, 2006), así como en poblaciones cultivadas de Marruecos (Sidina *et al.*, 2009). Sin embargo, debido al bajo nivel de polimorfismo que presentan estos marcadores, entre otras limitaciones, actualmente se prefiere el uso de marcadores genéticos basados en DNA.

Tabla 2.1. Marcadores moleculares utilizados para determinar la diversidad genética y estructura poblacional en el algarrobo.

Marcadores moleculares	Ámbito geográfico	Hábitat	Referencia
Isoenzimas	España, Portugal y Chipre	cultivado	Tous et al. (1992)
	Túnez	natural	Makrem et al. (2006)
	Marruecos	cultivado	Sidina et al. (2009)
RAPD	Libano	seminatural	Talhok et al. (2005)
	Túnez	natural	Afif et al. (2008)
	Marruecos	natural	Konaté et al. (2007)
	Siria	natural	Mahfoud et al. (2018)
AFLP	España, Italia, Turquía e Israel	natural y cultivado	Caruso et al. (2008a)
	Croacia		Bolaric et al. (2021)
AFLP y RAPD	Portugal	natural	Barracosa et al. (2008)
ISSR	Marruecos	natural	Konaté et al. (2009)
	Marruecos	natural	Zaggoumi et al. (2024)
EST-SSR	España, Italia y Malta	natural y cultivado	La Malfa et al. (2014)
	España, Marruecos y Libano	seminatural	El-Chami et al. (2024)
SRR	Argelia, Chipre, España, Francia, Grecia, Italia, Libano, Marruecos, Portugal y Turquía	natural y cultivado	Viruel et al. (2019)
	Argelia, Australia, Croacia, Chipre, Israel, Italia, Marruecos, Portugal, España, Túnez, Turquía y Estados Unidos	natural y cultivado	Di Guardo et al. (2019)
SSR y SNP	Argelia, Chipre, España, Francia, Grecia, Italia, Libano, Marruecos, Portugal y Turquía	natural, seminatural y cultivado	Baumel et al. (2022)
SRAP	Turquía	natural	Keles et al. (2022)

Se ha utilizado la técnica RAPD (Amplificación Aleatoria de DNA Polimórfico, en inglés *Random Amplified Polymorphic DNA*) para el análisis de poblaciones naturales o seminaturales en el Líbano, Marruecos, Túnez y Siria (Talhok et al., 2005; Afif et al., 2006; Konaté et al., 2007; Mahfoud et al., 2018). Barracosa et al. (2008) analizaron accesiones de la región del Algarve utilizando RAPD y otra técnica denominada AFLP (Polimorfismos en la Longitud de Fragmentos Amplificados, en inglés *Amplified Fragment Length Polymorphism*). La técnica AFLP también ha sido utilizada para estimar la diversidad genética entre poblaciones de algarrobo de Italia, España, Turquía e Israel (Caruso et al., 2008a) y en Croacia (Bolaric et al. 2021). Los marcadores ISSR (Inter-Secuencias Simples Repetitivas, en inglés *Inter Simple Sequence Repeat*) se han utilizado en poblaciones naturales de Marruecos (Konaté et al., 2009; Zaggoumi et al., 2024). La técnica SRAP (Polimorfismos Amplificados Relacionados con la Secuencia, del inglés *Sequence-Related Amplified Polymorphism*) se han empleado para analizar la diversidad genética en poblaciones naturales de algarrobo en Turquía (Keles et al., 2022). Con el avance de las técnicas y las mejoras aportadas por los marcadores SSR (Repeticiones de Secuencias Simples o microsatélites, en inglés, *Simple Sequence Repeat*) ha sido posible aumentar la capacidad de detectar variación genética y la precisión de las estimaciones, ya que estos marcadores son muy polimórficos y altamente repetibles. Dentro de los marcadores SSR, se distinguen dos tipos: los SSR genómicos, que derivan de regiones no codificantes del DNA, y los EST-SSR, que se obtienen a partir de secuencias de RNA mensajeros que permiten analizar variabilidad en genes funcionales. El uso de EST-SSR ha permitido caracterizar la

diversidad genética de poblaciones de algarrobo en España, Italia y Malta (La Malfa *et al.*, 2014), así como en España, Marruecos y Líbano (El-Chami *et al.*, 2024). Por otro lado, con una aproximación espacial más amplia, los trabajos de Viruel *et al.* (2019) y Di Guardo *et al.* (2019) han empleado SSR para analizar poblaciones o individuos. Baumel *et al.* (2022), en un estudio de poblaciones de distintas procedencias mediterráneas, han combinado análisis SR en combinación con SNP (polimorfismo de nucleótido único, en inglés *Single Nucleotide Polymorphism*), técnica relativamente reciente que ofrece una alta densidad de información, estabilidad y posibilidad de análisis a gran escala.

El análisis genético mediante marcadores moleculares basados en DNA sigue un flujo de trabajo bien definido, e incluye la recolección de material vegetal, la extracción y cuantificación del DNA, la selección de marcadores moleculares adecuados, la amplificación del DNA mediante reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y, finalmente, el genotipado junto con el análisis bioinformático y estadístico de los datos obtenidos (Fig. 2.1).

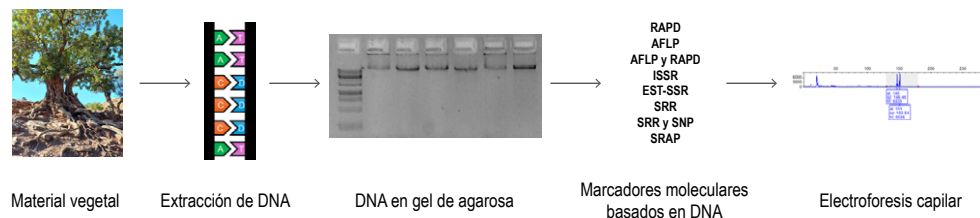


Figura 2.1. Esquema del flujo de trabajo para el análisis genético mediante marcadores moleculares basados en DNA.

2.2.2. Diversidad genética y diferenciación genética

Los resultados de los trabajos presentados en el epígrafe anterior indican que la mayor parte de la variación genética se encuentra dentro de cada población y es menor entre poblaciones. Estas observaciones responderían, en parte, a la biología reproductiva de la especie: la diversidad entre individuos de una misma población se vería promovida por la fecundación cruzada obligada, al ser una especie predominantemente dioica; por el contrario, la migración de genes vía polen o mediante el transporte de semillas entre poblaciones se vería limitada por el peso de éstas y por la polinización principalmente entomófila de la especie.

La diversidad intrapoblacional es particularmente elevada en Marruecos (Konaté *et al.*, 2009; Zaggoumi *et al.*, 2024), Túnez (Affif *et al.*, 2008) y Croacia (Bolaric *et al.*, 2021), en comparación con la estimada en poblaciones de Siria (Mahfoud *et al.*, 2018), España, Italia y Turquía (Caruso *et al.*, 2008a). La elevada diversidad genética intrapoblacional sugiere la existencia de potencial adaptativo de las poblaciones analizadas frente a cambios ambientales y constituye una buena base para su evolución.

En relación con la variación en la composición genética entre diferentes poblaciones, variación denominada diferenciación genética, los resultados de los diferentes estudios indican situaciones muy diferentes, en función de las poblaciones analizadas y de la escala espacial de trabajo. Así, se ha encontrado una fuerte correlación entre la diferenciación genética y la distancia geográfica en poblaciones marroquíes (Afif *et al.*, 2008; Zaggoumi *et al.*, 2024). Sin embargo, La-Malfa *et al.* (2014) observaron un alto grado de mezcla genética en su análisis de poblaciones

de España, Italia y Malta, sugiriendo la existencia de ancestros comunes. Estos autores atribuyen esta baja diferenciación genética a la manipulación efectuada por el hombre en el proceso de domesticación de la especie; en concreto, a la posible propagación asexual y al movimiento de clones en el Mediterráneo occidental. De manera similar, El-Chami *et al.* (2024) identificaron genotipos clonales entre individuos dentro de las poblaciones de España y, de forma independiente, dentro de las del Líbano, así como una estructura genética comparable entre las poblaciones de Marruecos y España.

Por otro lado, cabe destacar que se han encontrado correlaciones significativas en análisis conjuntos de datos morfológicos y genéticos en poblaciones de Croacia y Siria (Mahfoud *et al.*, 2018; Bolarić *et al.*, 2021). Estos resultados sugieren que las variaciones fenotípicas y genéticas se ven, en cierta medida, asociadas.

Más allá de estos trabajos, de carácter regional, cabe destacar los resultados de los trabajos de Viruel *et al.* (2019) y Baumel *et al.* (2022) que incluyen un gran número de poblaciones del ámbito de distribución de la especie y aportan una perspectiva de mayor precisión y capacidad de análisis genético detallado debido a las técnicas moleculares utilizadas. Los resultados de estos dos trabajos coinciden en la existencia de una alta estructuración genética de las poblaciones mediterráneas en sentido este-oeste (Fig. 2.2). El trabajo de Baumel y colaboradores indica que esta divergencia sería el resultado de la expansión natural de la especie antes de la última glaciación desde un único refugio, probablemente localizado en el sudoeste de Marruecos, región que presenta las poblaciones con mayor diversidad genética. Así, esta conclusión y la existencia de fósiles en la región occidental mediterránea (Viruel *et al.*, 2020) ponen luz al controvertido tema del origen y distribución natural del algarrobo y rebate la teoría de que el algarrobo se originó en la región del Mediterráneo oriental y que apoya la llamada “hipótesis del refugio oriental” (Batlle y Tous, 1997; Zohary, 2002).

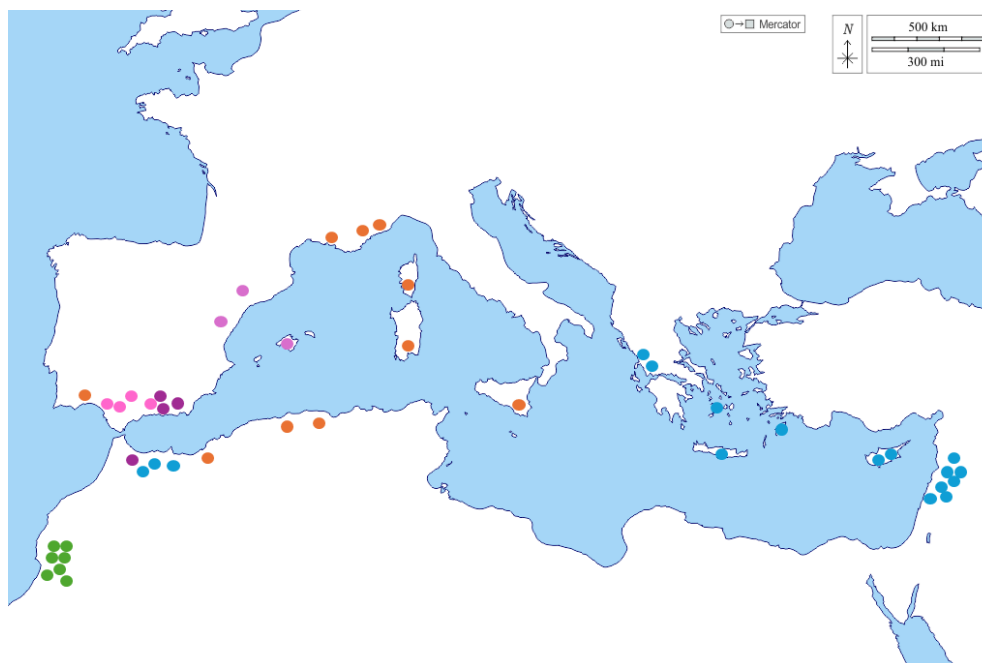


Figura 2.2. Distribución geográfica aproximada de las poblaciones de algarrobo analizadas en los estudios de Viruel *et al.* (2019) y Baumel *et al.* (2022).

En relación con el cultivo de la especie, los resultados de Baumel *et al.* (2022) respaldan la hipótesis de que los eventos de domesticación del algarrobo fueron múltiples y mayoritariamente locales a partir de ejemplares silvestres, si bien habrían tenido lugar movimientos puntuales de material de algarrobo asociadas a migraciones históricas hacia el oeste de los pueblos circunmediterráneos. Esta hipótesis explicaría la ya comentada observación de El-Chami *et al.* (2024) en relación con la detección de genotipos comunes (al menos para los marcadores utilizados por estos autores) entre España y el Líbano.

En definitiva, de acuerdo con los resultados de los trabajos exhaustivos de Viruel *et al.* (2019) y Baumel *et al.* (2022), las poblaciones de Grecia, Turquía, Chipre, Líbano, Francia, Italia y Argelia parecen presentar una estructura genética más definida (Fig. 2.2). En contraste, las poblaciones de España y Marruecos muestran una delimitación genética menos clara, lo que resalta la necesidad de estudios adicionales para caracterizar su variabilidad y definir con mayor precisión sus patrones de diferenciación.

2.3. Diversidad genética y estructura de poblaciones españolas

El algarrobo se distribuye en las regiones costeras del este y sur de la Península Ibérica. En España se encuentra principalmente en Cataluña, Valencia, Islas Baleares, Murcia y Andalucía (Fig. 2.3).

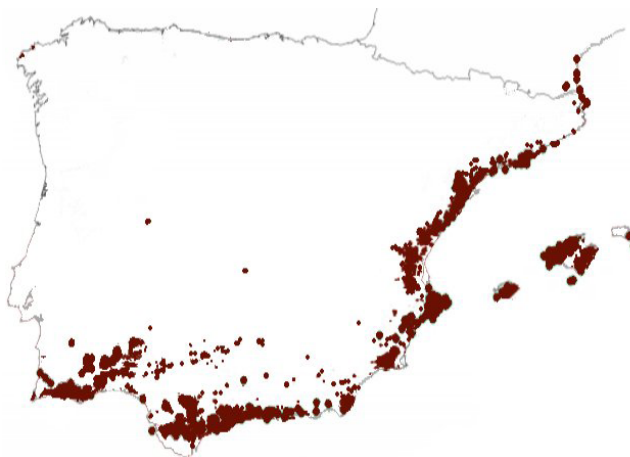


Figura 2.3. Distribución del algarrobo en la Península Ibérica. Elaboración propia a partir de diferentes bases de datos.

Algunos de los estudios en base a marcadores moleculares para la especie han incluido muestreos, con mayor o menor intensidad, de poblaciones españolas (Tous *et al.*, 1992; Caruso *et al.*, 2008a; La-Malfa *et al.*, 2014; Viruel *et al.*, 2019; Di Guardo *et al.*, 2019; Baumel *et al.*, 2023; El-Chami *et al.*, 2024). Así, Viruel *et al.* (2019) y El-Chami *et al.* (2024) han señalado una estructura genética similar entre las poblaciones de algarrobo de Andalucía y las de Marruecos. Por su parte, Di Guardo *et al.* (2019), encontraron diferencias claras entre los individuos de Andalucía y los procedentes del noreste de España (Cataluña, Valencia, Islas Baleares y Murcia), estos últimos con mayor afinidad

a variedades seleccionadas, debido, posiblemente, al cultivo intensivo de la especie en estas regiones. Baumel *et al.* (2022) identificaron ligeras diferencias genéticas entre las poblaciones del este y oeste de Andalucía, lo que sugiere una posible segregación dentro de la región. No obstante, el número de poblaciones analizadas es relativamente bajo en comparación con la extensa distribución del algarrobo en Andalucía abarcando una amplia variedad de condiciones ambientales. Esto limita la precisión de los resultados obtenidos, impidiendo una caracterización exhaustiva de la variación genética real de la región. Para obtener una visión más precisa de la diversidad genética del algarrobo en Andalucía sería necesario incrementar el número de poblaciones analizadas, particularmente en áreas menos representadas en los estudios mencionados. De esta manera, se podría capturar de forma más completa la complejidad de la estructura genética y las posibles variaciones locales presentes en la región.

Para cubrir esta carencia, El-Chami *et al.* (2024), analizaron 65 individuos de algarrobo muestreados en distintas localidades de Andalucía Occidental (Cádiz, Córdoba y Sevilla) y Andalucía Oriental (Almería, Granada y Málaga) utilizando ocho EST-SSR previamente descritos en Caruso *et al.* (2008a) y La-Malfa *et al.* (2014) (Fig. 2.4). Los resultados preliminares de este estudio indican que los individuos de Almería y Sevilla muestran una estructura genética similar, mientras que el resto de las poblaciones, aunque comparten parte de su composición genética, presentan cierto grado de diferenciación. Si bien es necesario ampliar el estudio incluyendo un mayor número de individuos y de marcadores SSR, estos resultados evidencian la riqueza genética del algarrobo en Andalucía. Esta información, como se remarcó anteriormente, es de gran utilidad para el diseño de estrategias de conservación de sus recursos genéticos, así como para la selección de individuos con características deseables en programas de mejora genética frente al cambio climático.

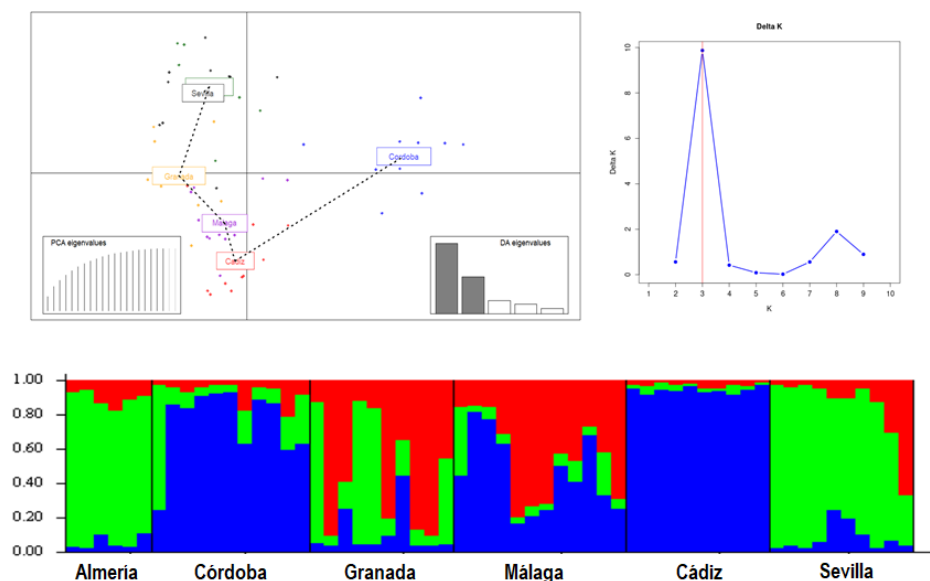


Figura 2.4. Análisis de la estructura genética de 65 individuos de algarrobo muestreados en distintas localidades de Andalucía: análisis discriminante de componentes principales (DAPC, por sus siglas en inglés, *Discriminant Analysis of Principal Components*) (sup. izqda.); determinación del número óptimo de conglomerados o clusters mediante el método Delta K, indicando un K óptimo de 3 (sup. dcha); representación gráfica de la estructura poblacional de 65 individuos (cada individuo se muestra como una línea vertical y los colores (verde, rojo y azul) representan su asignación a cada uno de los 3 clusters identificados.

2.4 Regulación genética de la determinación sexual

Como se ha indicado en el capítulo 1, el algarrobo se describe como una planta dioica, aunque ocasionalmente se encuentran ejemplares hermafroditas (normalmente con flores masculinas y hermafroditas en la misma inflorescencia) tanto en poblaciones naturales como en cultivos. La frecuencia de los individuos hermafroditas en poblaciones naturales probablemente esté influenciada por factores ambientales (Battle y Tous, 1997), pero parecen ser raros en este tipo de poblaciones. Sin embargo, están muy extendidos en los cultivos italianos y españoles porque fueron seleccionados y difundidos por los agricultores por su reproducción favorable. No obstante, las variedades femeninas, aunque requieren árboles donantes de polen en los huertos, generalmente son más productivas si se las compara con las variedades hermafroditas (Battle y Tous, 1997). Condit (1919) informó que la proporción de individuos masculinos y femeninos es de aproximadamente 1:1 incluyendo algunos hermafroditas, pero esta relación cambia dependiendo de las regiones. En las Islas Baleares, la frecuencia de hermafroditas es mayor que en la Península Ibérica (Tous *et al.*, 2001); en Marruecos es de 3:1 (Sbay, 2008). En países como España, Italia y Chipre, en huertos injertados la proporción de individuos masculinos y femeninos que se establece para asegurar una polinización suficiente oscila entre 1:3 y 1:6 (Russo, 1954; Orphanos, 1980).

La determinación sexual en el algarrobo es un desafío importante para la creación de huertos y el desarrollo de programas de mejora genética. Si las plantas de algarrobo en la naturaleza tienen sexos separados, debe existir un mecanismo preciso que lo determine, mecanismo desconocido y que requiere investigación. Tucker (1992) y Retana *et al.* (1994) indican que los aspectos moleculares relacionados con la sexualidad de esta especie son poco conocidos. En cualquier caso y en términos evolutivos, la unisexualidad se considera generalmente un carácter derivado del estado ancestral bisexual (Parkin, 1951; Takhtajan, 1969).

Thompson (1944) encontró una enorme variación dentro de las inflorescencias individuales del algarrobo y pensaba que los primordios de los órganos florales no estaban desarrollados al inicio de la floración, permitiendo que la proporción de flores masculinas y femeninas variara de manera impredecible. Sin embargo, Tucker (1992) determinó que las flores son inicialmente bisexuales y se vuelven funcionalmente unisexuales por la posterior supresión de los estambres o el carpelo. Schroeder (1959) agrupó 59 cultivares de algarrobo que crecían en California en cinco clases florales basadas en la expresión sexual a lo largo de la temporada y determinó que mientras los árboles adultos mantenían sus tipos florales, los individuos jóvenes presentaban variación en la formación y madurez de los estambres.

Caruso *et al.* (2008b) proponen que el etileno interviene en el proceso de la determinación sexual, encontrando una correlación positiva entre los niveles de expresión de la 1-Aminocyclopropanecarboxylic acid oxidase (ACO) y el factor de transcripción de Ethylene Insensitive 3 (EIN3) y las flores de individuos tanto machos como hermafroditas. Los niveles relativos de expresión de S-adenosylmethionine 1 (SAM sintasas 1) fueron mayores en las flores de las hembras, mientras que las otras dos S-adenosylmethionine (SAMS2 y SAMS3) se expresaron más en el genotipo hermafrodita. Las transcripciones del gen radical-induced cell death 1 (RCD1) fueron más altas en los genotipos dioicos, sin diferencia evidente entre machos y hembras.

La determinación del sexo en una etapa temprana del crecimiento en esta especie, cuyo período juvenil es largo, es importante en los programas de mejora. Así, Kaya y Dalkiliç (2021), señalan que el marcador RAPD OPA17-750 estaría relacionado con el sexo con una fiabilidad estimada del 80 %, al haberse detectado exclusivamente en los progenitores masculinos.

2.5 Genómica

2.5.1. Genoma del algarrobo

En los últimos años, la exploración de la biodiversidad mundial a nivel molecular ha suscitado un interés creciente. Esta tendencia ha dado lugar a la formación de consorcios internacionales (por ejemplo, el Árbol de la Vida de Darwin en Gran Bretaña, el Atlas Europeo del Genoma de Referencia, o el Proyecto BioGenoma de la Tierra) que aspiran a secuenciar el DNA de todas las plantas y animales del planeta. Sin embargo, cabe resaltar que los recursos genómicos del algarrobo son limitados, lo que dificulta la comprensión de las bases moleculares que regulan aspectos fundamentales de su biología, como el crecimiento, la reproducción y la respuesta a factores ambientales.

En este ámbito, la investigación con algarrobo es muy residual. Se especula sobre aspectos básicos, como es el del tamaño del genoma. El análisis por citometría de flujo (Bureš *et al.*, 2004) revela un contenido medio de DNA nuclear 2C de 1173.6 a 1271.4 Mbp (El Ferchichi Ouarda *et al.*, 2008). El número cromosómico del algarrobo, en condiciones diploides, es 24 ($2n = 24$) (Goldblatt, 1981). Aunque es considerado como una especie diploide, también se han reportado algunos casos de triploidía (3x) y tetraploidía (4x) (Bureš *et al.*, 2004).

El primer genoma disponible del algarrobo se ha obtenido mediante la tecnología de secuenciación de lectura larga PacBio HiFi, a partir de un cultivar autóctono de Creta (Grecia) (Bibi *et al.*, 2023). Esta tecnología permite la secuenciación de fragmentos largos (15-50 kb) con alta precisión, lo que la convierte en una opción ideal para ensamblajes de novo y la resolución de regiones repetitivas del genoma. El tamaño total del genoma ensamblado es de 492 Mbp, y consta de 17 contigs de gran tamaño (>10 Mbp), con una estimación del 96 % de genes completos (Fig. 2.5); un tamaño menor que el determinado por El Ferchichi Ouarda *et al.* (2008). Se identificaron 43965 genes codificadores de proteínas y un 44,76 % del genoma corresponde a secuencias repetidas, siendo los elementos de repetición terminal larga (LTR) los más abundantes (16,84 %) (Fig. 2.5).



Figura 2.5. Caracterización del genoma del algarrobo: proporción de genes codificantes de proteínas (izqda.) y porcentaje de secuencias repetitivas en el genoma (dcha.). Fuente: Bibi *et al.* (2023).

Chlyah *et al.* (2024) también ha generado un borrador del genoma del algarrobo de un individuo marroquí utilizando la plataforma Illumina. Esta tecnología permite obtener lecturas mucho más cortas (50-300 pb) pero con un mayor número de lecturas por corrida, lo que permite escalabilidad. A su vez, Akustu *et al.* (2024) también han generado otro borrador del genoma de esta especie a partir de hojas y tallos maduros de un individuo localizado en el Jardín Botánico Koishikawa, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Tokio (Japón). Este genoma se obtuvo mediante la combinación de tecnologías de secuenciación PacBio e Illumina, lo que permitió aumentar la cobertura y precisión del ensamblaje. En este estudio, el tamaño del genoma ensamblado fue de 482 Mbp, que está cerca del tamaño del genoma estimado previamente (Bibi *et al.*, 2023). Se identificaron 32.730 genes codificadores de proteínas y se estimó que un 46,50 % del genoma corresponde a secuencias repetidas.

2.5.2. Genes codificantes

Caruso *et al.* (2008b) desarrollaron la primera base de datos de genes expresados en flores de algarrobo. Para ello, secuenciaron bidireccionalmente 1.056 clones de una biblioteca de DNA complementario (cDNA) obtenida de flores de esta especie. Como resultado, identificaron 1.096 unigenes asociados a procesos clave, incluyendo el desarrollo floral y la reproducción sexual, la respuesta al estrés, la síntesis de galactomanano y la regulación hormonal.

El objetivo principal del trabajo publicado por Akastu *et al.* (2024) fue la identificación de genes implicados en la síntesis de galactomanano, un polisacárido que se acumula en el endospermo durante el desarrollo de la semilla del algarrobo. Este compuesto es ampliamente utilizado en la industria alimentaria como espesante y gelificante. Aunque los genes responsables de la biosíntesis del galactomanano han sido ampliamente estudiados en leguminosas, muy poca información hay descrita sobre éstos en el algarrobo. En su investigación, los autores identificaron un conjunto de, aproximadamente, 27 genes potencialmente asociados con la vía de biosíntesis del galactomanano en el algarrobo, con especial atención a aquellos que codifican las enzimas clave del proceso: la manano sintasa (ManS) y la galactomanano galactosyltransferase (GMGT), responsables del paso final de su síntesis. Además de generar el primer ensamblaje del genoma del algarrobo, el estudio también presentó el primer transcriptoma de hoja, tallo y callo de la especie. Se identificaron 22518 genes comunes a los tres tejidos, así como 1264, 913 y 1720 genes específicos de hoja, tallo y callo, respectivamente. Para caracterizar los genes asociados con la biosíntesis del galactomanano, se analizaron los perfiles de expresión génica mediante RNA-seq. Los genes con una expresión significativamente mayor en el endospermo en comparación con otros tejidos codificaban enzimas clave como sacarosa sintasa, manosa-6-fosfato isomerasa, β -galactosidasa, aldosa-1-epimerasa, β -manosidasa, estaquiosa sintasa, galactinol sintasa, UDP-galactosa 4-epimerasa y fosfoglucoisomerasa. En cambio, los genes con niveles de expresión más bajos en el endospermo codificaban la glucoquinasa, la sorbitol deshidrogenasa, la invertasa, la sacarosa fosfato fosfatasa, la galactosa-1-fosfato uridiltransferasa y la fructoquinasa. Por otro lado, algunos genes no presentaron diferencias significativas en su nivel de transcripción entre el endospermo y otros tejidos, como los que codifican fosfomutasa, manosa-1-fosfato guanililtransferasa, sacarosa fosfato sintasa, galactocinasa, rafinosa sintasa y α -galactosidasa. Finalmente, al examinar los genes predichos dentro de los grupos ortólogos de ManS y GMGT, se observó que tanto el gen ManS (g23576.t1) como el gen GMGT (g31248.t1) mostraban una expresión marcadamente específica en el endospermo. Los resultados de RNA-seq

fueron validados mediante RT-qPCR, confirmando que la transcripción de estos ortólogos de ManS y GMGT era significativamente más abundante en el endospermo en comparación con otros tejidos.

2.6 Conclusiones y perspectivas

La investigación molecular en el algarrobo es mínima comparada con otros aspectos tales como su biología reproductiva, fisiología y características agronómicas. Hasta el momento, esta investigación se ha centrado principalmente en la caracterización de la variabilidad y estructura genética de las poblaciones situadas en la región mediterránea. Se dispone, por tanto, de información que permite identificar la variabilidad genética tanto dentro como entre las poblaciones. Como resultado de dichos estudios, cabe destacar la alta diversidad genética de las poblaciones; aspecto que hace viable la selección artificial. Por otro lado, se han observado claras diferencias genéticas entre las poblaciones del este y el oeste del área mediterránea, que, según el marcador genético utilizado, estaría indicando el proceso evolutivo de la especie, por un lado, y, por otro, posibles adaptaciones diferenciales frente a condiciones ambientales distintas, como el clima o las características edáficas.

Sin embargo, esta información, aunque valiosa, restringe el análisis genético limitando la comprensión completa de los procesos biológicos y la variabilidad genética en su totalidad. En este sentido, el uso de enfoques más amplios, incluyendo las modernas técnicas ómicas, permitiría obtener una visión más integral de la biología molecular del algarrobo. Siguiendo la ecuación genética fenotipo = genotipo (+ epigenética) + ambiente, el factor genotipo puede ser caracterizado mediante las modernas técnicas ómicas (genómica, epigenómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica), que proporcionan una visión más global e integradora de la biología del algarrobo. Estos enfoques permitirían no solo comprender los componentes genéticos fundamentales, sino también explorar la interacción entre genes, proteínas y metabolitos y su relación con las respuestas ambientales y las variaciones fenotípicas.

Afortunadamente, en la actualidad se dispone de genomas secuenciados de individuos de algarrobo provenientes de Grecia (Bibi *et al.*, 2023), Marruecos (Chlyah *et al.*, 2024) y Japón (Akutsu *et al.*, 2024). La disponibilidad de estos genomas facilita la identificación de genes clave relacionados con la producción, la calidad de los frutos, la determinación del sexo, así como la respuesta a estreses bióticos y abióticos. No obstante, para obtener una comprensión más completa de la biología molecular del algarrobo, sería fundamental secuenciar individuos femeninos, masculinos y hermafroditas. Este enfoque permitiría una visión holística de las características de interés de esta especie.

Para comprender los procesos moleculares subyacentes a la producción, la calidad de los frutos, la determinación del sexo y las respuestas a estreses bióticos y abióticos, así como la regulación de rutas metabólicas clave, es fundamental profundizar en el estudio de la función de genes específicos en diferentes tejidos y etapas del desarrollo. Identificar genes clave involucrados en procesos como la resistencia al estrés, la producción de galactomanano o la regulación de la sexualidad es crucial

para comprender la biología molecular del algarrobo. La asociación de variaciones genéticas con rasgos agronómicos y adaptativos, como la resistencia a la sequía o la mejora en la producción de semillas con mayor contenido de galactomanano, podría realizarse mediante un GWAS (análisis de asociación del genoma completo, en inglés en inglés, Genome-Wide Association Study). El uso de los marcadores SNP permitirá la implementación de programas de mejoramiento genético más eficaces. Además, el estudio de marcas epigenéticas, como la metilación del DNA o las modificaciones de histonas, podría aportar información sobre cómo se regulan los genes en respuesta a factores ambientales y al proceso de domesticación. Por otra parte, la incorporación de enfoques transcriptómicos, proteómicos y metabolómicos brindaría una visión más detallada y dinámica de los procesos biológicos subyacentes. La transcriptómica permitiría identificar y cuantificar los genes expresados en diferentes condiciones, revelando patrones de expresión relacionados con la resistencia al estrés, la calidad de los frutos y la determinación del sexo. La proteómica ofrecería información crucial sobre los perfiles de proteínas presentes en diferentes tejidos, etapas de desarrollo y condiciones ambientales, permitiendo comprender mejor las interacciones entre los genes y los metabolitos, además de proporcionar información sobre las vías metabólicas activas. La metabolómica ofrecería una visión integral de los metabolitos presentes en los tejidos, permitiendo una comprensión más profunda de las rutas metabólicas involucradas en la producción de compuestos de interés, como los galactomananos. Además, facilitaría la identificación de biomarcadores de calidad de los frutos, lo que contribuiría a la selección de variedades con características deseables para la industria alimentaria y la mejora de la productividad del cultivo.

Finalmente, la integración de datos multiómicos (genómica, epigenómica, transcriptómica, metabolómica y proteómica) en la dirección de la Biología de Sistemas proporcionará una visión más completa y precisa de esta especie. A medida que se avance en estos estudios, el algarrobo podría posicionarse como una especie modelo para su uso en regiones con condiciones ambientales desfavorables, como se prevé en España, especialmente en el sur del país, donde la sequía y el cambio climático son desafíos cada vez mayores.

Bibliografía

- Afif, M., Najeh, B. F., Laarbi, K. M., Mohamed, B. (2006). Genetic diversity in Tunisian *Ceratonía siliqua* L. (Caesalpinioideae) natural populations. *Genet. Resour. Crop Evol.* 53, 1501-1511.
- Akutsu, M., Shinozawa, A., Nishiyama, T., Sakata, Y., Hiwatashi, Y. (2024). De novo sequencing allows genome-wide identification of genes involved in galactomannan synthesis in locust bean (*Ceratonía siliqua*). *DNA Res.* 31, dsae033.
- Albanell, E., Caja, G., Plaixats, J. (1991). Characteristics of Spanish carob pods and nutritive value of carob kibbles. *Options Mediterraneennes. Serie A: Seminaires Mediterraneens (CIHEAM)*.
- Ali, E. S., Mustafa, H. M., Blkasem, K. A. O. (2019). Morphological variation of Libyan carob (*Ceratonía siliqua* L.). *Al-Mukhtar J. Sci.* 34, 126-133.
- Barracosa, P., Osorio, J., Cravador, A. (2008). Evaluation of fruit and seed diversity and characterization of carob (*Ceratonía siliqua* L.) cultivars in Algarve region. *Sci. Hortic.* 114, 250-257.
- Battle, I. (1997). Carob tree: *Ceratonía siliqua* L.-Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17. Bioversity International.
- Battle, I., Tous, J. (1997). Carob tree. *Ceratonía siliqua*. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops, 17. IPK, Gatersleben, Germany / IPGRI, Rome, Italy.
- Baumel, A., Nieto Feliner, G., Médail, F., La Malfa, S., Di Guardo, M., Bou Dagher Kharrat, M., Fatma Lakhal-Mirleau, F., Frelon, V., Ouahmane, L., Diadema, K., Sanguin, H., Viruel, J. (2022). Genome-wide footprints in the carob tree (*Ceratonía siliqua*) unveil a new domestication pattern of a fruit tree in the Mediterranean. *Mol. Ecol.* 31, 4095-4111.
- Bibi, A. C., Ioannidis, P., Bazakos, C., Kalantidis, K. (2023). Genome sequencing, assembly and annotation of the carob tree, *Ceratonía siliqua* (Eudicots: Fabaceae). *bioRxiv*, 2023-02.
- Bolaric, S., Müller, I. D., Vokurka, A., Cepo, D. V., Ruscic, M., Srecec, S., Kremer, D. (2021). Morphological and molecular characterization of Croatian carob tree (*Ceratonía siliqua* L.) germplasm. *Turk. J. Agric. For.* 45, 807-818.
- Bureš, P., Pavlíček, T., Horová, L., Nevo, E. (2004). Microgeographic genome size differentiation of the carob tree, *Ceratonía siliqua*, at 'Evolution Canyon', Israel. *Ann. Bot.* 93, 529-535.
- Caruso, M., La Malfa, S., Pavlíček, T., Frutos Tomñs, D., Gentile, A., Tribulato, E. (2008a). Characterisation and assessment of genetic diversity in cultivated and wild carob (*Ceratonía siliqua* L.) genotypes using AFLP markers. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 83, 177-182.
- Caruso, M., Distefano, G., Ye, X., La Malfa, S., Gentile, A., Tribulato, E., Roose, M. L. (2008b). Generation of expressed sequence tags from carob (*Ceratonía siliqua* L.) flowers for gene identification and marker development. *TGG* 4, 869-879.
- Chlyah, O., Mdarhi, M. A., El Ghoubali, D., Kieras, M., Pirro, S., Ghazal, H. (2024). The complete genome sequence of *Ceratonía siliqua* L. (Fabaceae, Fabales), carob. *BGE* 2024, 10-56179.
- Condit, D. D. (1919). Oil shale in western Montana, southeastern Idaho, and adjacent parts of Wyoming and Utah. US Government Printing Office.
- Di Guardo, M., Scollo, F., Ninot, A., Rovira, M., Hermoso, J. F., Distefano, G., La Malfa, S., Battle, I. (2019). Genetic structure analysis and selection of a core collection for carob tree germplasm conservation and management. *TGG* 15, 41.
- El Ferchichi Ouarda, H., Naghmouchi, S., Walker, D. J., Correal, E., Boussaïd, M., Khouja, M. L. (2008). Variability in the pod and seed parameters and nuclear DNA content of Tunisian populations of *Ceratonía siliqua*. *Caryologia* 61, 354-362.

- El-Chami, M. A., Palacios-Rodríguez, G., Navarro-Cerrillo, R. M., Chalak, L., Rey, M. D. (2024). Genetic diversity and population structure analysis of carob germplasm from Lebanon, Morocco and Spain: uncovering a potential asset for innovative breeding initiatives. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5383382/v1>
- El-Kahkahi, R., Zouhair, R., Ait Chitt, M., Errakhi, R. (2014). Morocco carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Int. J. Pure App. Biosci.* 2, 38-47.
- Goldblatt, P. 1981. Cytology and the phylogeny of the Leguminosae. Pp. 427-464 in *Advances in Legume Systematics*. Vol. 2 (R.M. Polhill and P.H. Raven, eds.). Royal Botanic Gardens, Kew, England.
- Govindaraj, P., Gowri, R., Mohanraj, K., Amalraj, V. A. (2021). SSR marker based molecular genetic diversity analysis among *Saccharum spontaneum* (L.) collected from North Western region of India. *Sugar Tech.* 23, 730-740.
- Haddarah, A. Ismail, A. Bassal, T. Hamieh, I. Ioannou, Ghoul, M. (2013). Morphological and chemical variability of Lebanese carob varieties. *Eur. Sci. J.* 9, 353-369.
- Kaya, D., Dalkiliç, Z. (2021). Determination of a sex-related RAPD marker in Carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Genetika* 53, 575-582.
- Keles H., H. Pinar, M. Unlu, G. Ilhan, M. R. Bozhuyuk, S. Ercisli (2022). Molecular characterization of wild carob (*Ceratonia siliqua* L.) genotypes by sequence-related amplified polymorphism (SRAP) techniques in Turkey. *Genetika* 54, 613-624.
- Konaté, F. A., Filali-Maltouf, A. (2007). Diversity analisis of Moroccan Carob (*Ceratonia siliqua* L.) accessions using phenotypic traits and RAPD markers. *Acta Bot. Malac.* 23, 79-90.
- Konaté, I., El-Bekky, B., Filali-Maltouf, A. (2009). Inter-simple sequence repeat markers variation among natural accessions of Moroccan carob tree (*Ceratonia siliqua*). *IJAB* 11, 168-172.
- La Malfa, S., Currò, S., Douglas, A. B., Brugaletta, M., Caruso, M., Gentile, A. (2014). Genetic diversity revealed by EST-SSR markers in carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Biochem. Syst. Ecol.* 55, 205-211.
- Lossaint, P. (1973). Soil-vegetation relationships in Mediterranean ecosystems of southern France. In: Castri, F., Mooney, H.A. (Eds.), *Mediterranean type ecosystems origin and structure*. Heidelberg Press, New York, pp. 199-210.
- Mahfoud, H., Ameen, T., Kazngi, F., Nasser, S. (2018). Morphological and genetic variability of natural Syrian carob (*Ceratonia siliqua* L.). *IJAES* 5, 70-76.
- Makrem, A., Najeh, B. F., Laarbi, K. M., Mohamed, B. (2006). Genetic diversity in Tunisian *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinioideae) natural populations. *Genet. Resour. Crop Evol.* 53, 1501-1511.
- Marakis, S., Kalaitzakis, J., Mitrakos, K. (1988). Criteria for recognizing carob tree varieties. Paper presented at the Proceedings of the II International Carob Symposium (P. Fito and Mulet, eds.) Valencia, Spain.
- Martins-Loução, M. A., Correia, P. J., Romano, A. (2024). Carob: A mediterranean resource for the future. *Plants* 13, 1188.
- Naghmouchi, S., Khouja, M., Romero, A., Tous, J., Boussaid, M. (2009). Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Sci. Hortic.* 121, 125-130.
- Orphanos, P.I. (1980). Practical aspects of carob cultivation in Cyprus. *Portug. Acta Biol.* XVI, 221-228.
- Parkin, J. (1951). The unisexual flower-a criticism. *Phytomorphology* 1, 75-79.
- Retana, J., Ramoneda, J., Garcia del Pino, F., Bosch, J. (1994). Flowering phenology of carob, *Ceratonia siliqua* L. (Cesalpinaceae). *J. Hortic. Sci.* 69, 97-103.
- Russo, F. 1954. Aspetti biologici e colturali del carrubo in Sicilia. *Ann. Sperimentazione Agraria* 8, 947-967.
- Sbay, H. (2008). Le Caroubier au Maroc: un arbre d'avenir. Centre de recherche forestière, Rabat, Morocco.
- Schroeder, C. A. (1959). The floral situation of the carob in California. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 74, 248-251.
- Sidina, M. M., El Hansali, M., Wahid, N., Ouattmane, A., Boulli, A., Haddioui, A. (2009). Fruit and seed diversity of domesticated carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. *Sci. Hortic.* 123, 110-116.

- Srećec, S., Kremer, D., Karlović, K., Peremin Volf, T., Erhatic, R., Augustinović, Z., Kvaternjak, I., Bolaric, S., Dujmovic Purgar, D., Valerija, D., Dna, B., Randić, M. (2016). Comparison of morphological characteristics of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) pods and seeds of populations collected from two distant Croatian Islands: Drvenik Mali and Mali Lošinj. *Agric. Conspec. Sci.* 81, 61-64.
- Takhtajan, A. (1969). *Flowering plants: origin and dispersal*. English translation by C. Jeffrey. Smithsonian Institution Press, Washington, DC.
- Talhouk, S. N., Van Breugel, P., Zurayk, R., Al-Khatib, A., Estephan, J., Ghalayini, A., Debian, N., Lychaa, D. (2005). Status and prospects for the conservation of remnant semi-natural carob *Ceratonia siliqua* L. populations in Lebanon. *For. Ecol. Manag.* 206, 49-59.
- Thompson, J. M. (1944). Toward a modern physiological interpretation of flowering. *Proceedings of the Linnean Society of London* 156, 46-69.
- Tous, J., Olarte, C., Truco, M. J., Arús, P. (1992). Isozyme polymorphisms in carob cultivars. *HortScience* 27, 257-258.
- Tous, J., Batlle, I., Romero, A. (2001). Prospección de variedades de algarrobo en las islas Baleares. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales* 16, 187-203.
- Tous, J., Romero, A., Batlle, I. (2013). The Carob tree: Botany, horticulture, and genetic resources. *Hortic. Rev.* 41, 385-456.

3. Conservación de recursos genéticos de algarrobo en Andalucía

**Rafael M.^a Navarro Cerrillo
Roberto J. Cabrera Puerto
Antonio Ángel García Mayoral
Francisco José Ruiz Gómez
Mohamad Ali El Chami
Guillermo Palacios Rodríguez**

3.1. Introducción

Un recurso genético se define como cualquier material de origen vegetal, animal, microbiano o de otro tipo que contiene unidades funcionales de la herencia (es decir, genes), y que tenga un valor real o potencial. Se trata, por tanto, de material de origen biológico, que puede incluir organismos concretos o partes de ellos (como por ejemplo tejidos, semillas, polen, etc.) y que representan la diversidad genética de una especie o contienen determinadas variantes genéticas de interés.

El interés de la información genética del algarrobo no solo radica en el alto valor económico de sus frutos, ricos en azúcares y compuestos bioactivos, sino que también es fundamental por el papel estratégico de la especie en la mitigación de la desertificación, la mejora de suelos marginales y la promoción de la biodiversidad. Por ello, la conservación de los recursos genéticos del algarrobo representa una prioridad estratégica para la sostenibilidad agroecológica y la resiliencia de los sistemas mediterráneos.

La erosión genética, impulsada por la intensificación agrícola, el abandono de variedades locales y el cambio climático, amenaza la variabilidad intraespecífica del algarrobo, comprometiendo su capacidad adaptativa y su potencial de mejora genética. En este contexto, la caracterización de los recursos genéticos mediante marcadores morfológicos, bioquímicos y moleculares permite identificar genotipos con atributos agronómicos, ecológicos y tecnológicos diferenciados, promoviendo su conservación eficiente, así como su integración en programas de selección y valorización. Como se ha indicado, preservar esta diversidad genética no solo garantiza la continuidad de los servicios ecosistémicos asociados al algarrobo, sino que también abre nuevas oportunidades para la innovación agroalimentaria, la restauración ecológica y la adaptación al cambio climático.

En el caso concreto de Andalucía, el algarrobo ha desempeñado históricamente un papel fundamental en los agroecosistemas de secano, como en otras regiones del oeste del Mediterráneo (Menconi *et al.*, 2024). Su rusticidad, su bajo requerimiento hídrico y su capacidad para desarrollarse en suelos pobres la ha convertido desde tiempos remotos en una especie clave para la diversificación agrícola y económica en las zonas marginales andaluzas. Sin embargo, el abandono del cultivo, la presión urbanística y la escasa rentabilidad comercial a partir de la década de los 80 del siglo pasado contribuyeron a una alarmante erosión genética de las variedades locales. Por ello, resulta imprescindible abordar la conservación de los recursos genéticos propios, ya que la región presenta una enorme diversidad de cultivares, así como de poblaciones naturales o naturalizadas, que muestran, en conjunto, una amplia variación genética (ver capítulo 2) y, también, fenotípica (Fig. 3.1). Esta iniciativa es



Figura 3.1. Ejemplo de la variación de la algarroba en Andalucía (QUERAT, 2024)

especialmente urgente ya que, a pesar de la evidente utilidad ecológica y productiva del algarrobo, se está produciendo una notable pérdida de individuos en muchas áreas (Rodríguez y Frutos, 1988), lo que debe paliarse, en parte, mediante un programa de conservación.

3.2. Antecedentes

En España, cabe destacar el esfuerzo de conservación de recursos genéticos del algarrobo realizado por el Banco Nacional de Germoplasma de algarrobo, administrado por el IRTA-Mas de Boe980 con financiación del INIA. En marzo de 2014, la colección del IRTA conservaba aproximadamente 93 cultivares, con información detallada sobre cada cultivar, y posicionándose como la más amplia de España (Rovira *et al.*, 2014). Existen otras colecciones en Villajoyosa (Alicante) y en Palma de Mallorca (Taberner *et al.*, 2023; Barceló-Anguiano *et al.*, 2024), pero el banco del IRTA destaca por disponer de la colección más amplia de materiales con características agronómicas y tecnológicas contrastadas (ej., producción, contenido en pulpa y semilla, etc.). Los datos de esta colección están disponibles a través del Centro de Recursos Fitogenéticos (CRF) del INIA, que forma parte de la Red Española de Recursos Fitogenéticos.

Tabla 3.1. Características agronómicas de los principales cultivares españoles de algarrobo (Battle y Tous, 1994).

Cultivar	Negra	Matalafera	Duraió	Rojal	Sayalonga	Ramillete	Banya Cabra
Origen	España	España	España	España	España	España	España
Sexo	Femenino	Femenino	Femenino	Femenino	Femenino	Hermafrodita	Femenino
Patrón de crecimiento	Abierto	Abierto	Llorón	Erecto	Abierto	Llorón	Abierto
Precocidad	Media	Media	Temprana	Muy temprana	Temprana	Muy temprana	Tardía
Resistencia a la abscisión de los frutos	Alta	Baja	Media	Baja	Baja	Alta	Media
Susceptibilidad a oídio	Alta	Baja	Media	Baja	Baja	Media	Media
Tamaño de la algarroba (longitud media = 15 cm)	Corta	Media-Larga	Media	Larga	Larga	Media-Larga	Larga
Forma de la algarroba	Recta	Recta	Recta	Curva	Curva	Curva	Torcida
Contenido en pulpa (peso seco de la pulpa)	Alto	Medio	Bajo-Medio	Medio	Medio	Alto	Bajo
Producción de semillas (unidades por fruto)	7 – 9	12 – 14	16 – 17	10 – 11	13 – 14	8 – 10	13 – 14
Contenido de endospermo (porcentaje de semillas en peso seco)	-	58	58	56,2	56	50,6	54,3

En Portugal existe un banco de germoplasma vegetal, con base en la zona de Tavira y Faro (Barracosa *et al.*, 2007), que incluye una colección de algarrobo (*alfarrobeira*). La Dirección Regional de Agricultura y Pesca mantiene una colección viva en el Centro de Experimentación Agrícola (CEA) de Tavira. En esta colección hay 44 variedades de algarrobo recuperadas de toda la región del Algarve, desde la costa hasta las sierras interiores. Algunas de estas variedades no tienen aptitud comercial en la actualidad y están en riesgo de desaparecer, pero se conservan gracias a este proyecto. A partir de los materiales conservados en esta colección se han estimado

rendimientos de hasta 10 toneladas de algarrobo por hectárea, muy por encima de la media regional (3 a 3,5 t ha⁻¹), incremento posible gracias a la selección de cultivares de mayor rendimiento y a la aplicación de riegos en su cultivo (Barracosa *et al.*, 2007; 2009).

También se han abordado estudios de caracterización de germoplasma en otros países en los que la especie tiene un notable interés económico, como en Italia (Barbagallo *et al.*, 1997), Turquía (Tetik *et al.*, 2011), Argelia (Boublenza *et al.*, 2019) y Croacia (Bolaric *et al.*, 2021).

3.3. Programa de conservación de recursos genéticos en Andalucía

El proyecto QUERAT (2024) inició, en el año 2021, un programa integral de recolección, caracterización y conservación de materiales vegetales y cultivares tradicionales de algarrobo en Andalucía. El objetivo de este programa fue identificar, recuperar, documentar y preservar la diversidad genética regional del algarrobo mediante un enfoque combinado de técnicas *in situ* y *ex situ* (Fig. 3.2), en concordancia con las recomendaciones recogidas en el Real Decreto 159/2022 sobre conservación de los recursos genéticos forestales y de la flora silvestre, con el Plan Nacional de Conservación de Recursos Genéticos Forestales (MITECO, 2024) y con la estrategia del programa EUFORGEN (2021).



Figura 3.2. Esquema del programa de caracterización y conservación de materiales vegetales y cultivares tradicionales de algarrobo en Andalucía.

3.3.1. Determinación de las áreas de prospección y recolección

Este trabajo inicial de obtención de información de partida es fundamental para asegurar la calidad del programa de conservación, ya que debe tenerse en cuenta que se trata de obtener muestras representativas de la diversidad genética regional del algarrobo andaluz y, especialmente, de las variedades tradicionales en riesgo de erosión genética o desaparición.

Para la selección de las áreas de prospección se tuvieron en cuenta criterios bio-geográficos, históricos y etnobotánicos en base a la siguiente información:

- Identificación de las zonas tradicionales de cultivo del algarrobo, como la Serranía de Ronda, las sierras litorales de Granada-Málaga (Sierra de la Almijara, Sierra de Lujar, etc.), la Alpujarra granadina, las campiñas gaditanas, entre otras.
- Revisión de las referencias bibliográficas previas de poblaciones de algarrobo (Rodríguez y Frutos, 1988; Tous *et al.*, 1995; Millán *et al.*, 2015).
- Consulta del Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (GBIF, por sus siglas en inglés) (<https://gbif.es/>; Fig. 3.3).
- Análisis del área de distribución del algarrobo en Andalucía a partir de la base cartográfica de la REDIAM (<https://portalrediam.cica.es/geonetwork/static/api/records/b17a8f642d82ea7492e8e1e925bf3acae769129f>; Fig. 3.4)
- Detección de árboles singulares aislados (Sánchez-Lancha, 2003).
- Resultados de entrevistas a informantes clave (agricultores mayores, técnicos rurales, etc.), incluyendo contactos personales con propietarios de fincas con árboles adultos, preferentemente no injertados o manejados de forma extensiva.

La información obtenida se integró en un Sistema de Información Geográfica, junto con la ortofotografía más reciente disponible en el REDIAM y el Instituto Geográfico Nacional (<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/home>), así como con cartografía de regionalización en base a parámetros edafoclimáticos (Alía *et al.*, 2009; Rosúa *et al.*, 2001) (Fig. 3.4 y 3.5). Con toda esta información, se definieron las áreas prioritarias de prospección (Fig. 3.6).

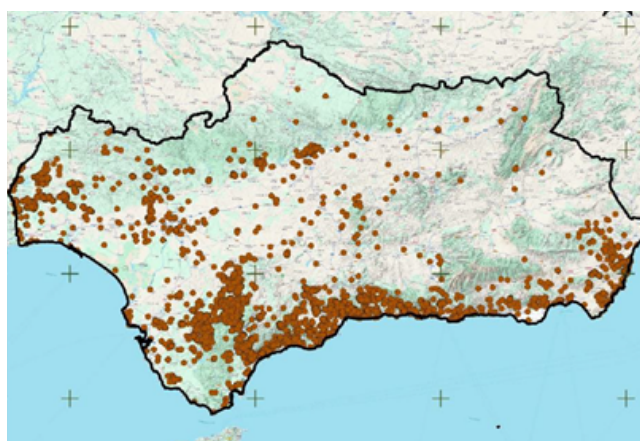


Figura 3.3. Presencias de algarrobo en Andalucía a partir de la base de datos del Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (GBIF) (N=25.038).

Respecto del contraste de la cartografía con presencia de algarrobos y las regiones de procedencia utilizadas en el marco del Real Decreto 289/2003 de comercialización de los materiales forestales de reproducción (publicadas por Resolución de 28 de julio de 2009 de la DG de Recursos Agrícolas y Ganaderas), si bien la especie no está regulada por dicha norma, resulta útil emplear dicho sistema de regionalización

38 Litoral su-oriental andaluz
40 Cordillera Subbética granadina
41 Orla meridional de la Depresión del Guadalquivir
42 Serranía de Ronda
43 Litoral meridional andaluz
44 Depresión del Guadalquivir
45 Sierra Morena meridional

Tabla 3.2. Correspondencia entre las regiones de procedencia establecidas a nivel nacional para diferentes especies y las establecidas para el algarrobo en Andalucía y áreas que incluyen.

Conservación del algarrobo

3.3.2. Protocolo de recolección y gestión de muestras

Con el fin de sistematizar este procedimiento, se establecieron protocolos para garantizar tanto la trazabilidad del material como su identidad genética y calidad fitosanitaria (Talhouk *et al.*, 2005; Garau *et al.*, 2022; Mithun *et al.*, 2023).

Una vez definidas las áreas de prospección prioritarias, se efectuaron salidas a campo para la prospección y, en su caso, recolección de materiales de los individuos de interés (Fig. 3.7). De todos los árboles visitados, se propició la colecta de materiales de individuos que poseían características únicas o diferenciadoras (tamaño de la vaina, rendimiento en semilla, producción de pulpa, resistencia a plagas, dehiscencia, sexo, etc.), cuando los individuos representaban localidades no muestreadas previamente o cuando éstos se encontraban en riesgo de desaparición por su edad o por estar situados en incas abandonadas o en zonas con presión urbanística. Se evitó recolectar árboles claramente injertados con variedades comerciales recientes, pero se priorizó cuando se trataba de árboles con injertos tradicionales. El número total de accesiones se resume en la Tabla 3.3.



Figura 3.7. Ejemplos de individuos de los que se efectuó recolección de material (QUERAT, 2024).

Tabla 3.3. Localización de accesiones de algarrobo recolectados en el marco del proyecto QUERAT.

Tipo de material	Almería	Cádiz	Córdoba	Granada	Huelva	Jaén	Málaga	Sevilla
Natural	20	171	22	25	17		62	21
Plantación	6	4	2		3	3	1	2
Cultivar tradicional	3	6	4	4			7	

Los trabajos de recolección se efectuaron durante los años 2022, 2023, 2024 y 2025, preferentemente durante el verano, época en la que las algarrobas alcanzan la madurez morfológica, fisiológica y presentan las características químicas óptimas (Bosch *et al.*, 1996; Mouniane *et al.*, 2024). Se siguiendo los siguientes criterios:

- Número de accesiones: se recolectaron entre 1 y 3 accesiones por localidad
- Material recolectado:
 - Frutos (vainas completas): al menos 2–3 kg por árbol.
 - Semillas: al menos 500 unidades por acceso, para caracterización y conservación.
 - Material vegetativo: se recolectaron estacas semileñosas para multiplicación clonal en los árboles visitados en época propicia para esta actividad.

- Hojas: en ejemplares prometedores, se procedió al muestreo de hojas adultas sanas para estudios moleculares.

El material recolectado se introdujo en bolsas de papel, etiquetadas con un código preasignado y se transportó en condiciones adecuadas para evitar su deterioro al Laboratorio de planta de alta calidad funcional del Grupo de Investigación ERSAF en la Universidad de Córdoba. Cada accesión se acompañó de una ficha de recolección estandarizada, en la que se registró la siguiente información: código alfanumérico único por acceso, datos geográficos del localización del parental, datos de las condiciones ambientales en el que se encuentra (tipo de suelo, pendiente, presencia de otras especies, etc.), características del árbol (edad estimada, estado sanitario, porte, fenología), contexto etnográfico (nombre local de la variedad (si existe), uso tradicional, historia oral sobre el árbol o la finca), y nombre del agricultor de custodia, si procede.

Una vez en el laboratorio, se efectuó una clasificación del material y un control de su identidad teniendo en cuenta la información recogida en las fichas de colecta (Fig. 3.8), y se procedió a su fotografiado en alta resolución. Posteriormente se procedió a su almacenamiento temporal en condiciones controladas (15–18 °C, 40–50 % HR), previo secado y limpieza, hasta su procesamiento para su caracterización.



Figura 3.8. Recepción de material de campo de algarrobo procedente de las campañas de colecta (QUERAT, 2024).

3.3.3. Caracterización

Una vez recolectado el material vegetal, es necesario proceder a su caracterización morfológica, bioquímica y molecular (Naghmouchi *et al.*, 2009; El Kahkahi *et al.*, 2015; Groske Díaz, 2016; Di Guardo *et al.*, 2019; Barceló *et al.*, 2023; Giovino *et al.*, 2023), ya que es información necesaria para la descripción de cualquier recurso genético con vistas a:

- revelar la amplitud de la diversidad fenotípica y genética muestreada,
- detectar individuos con características particularmente valiosas, tanto por su singularidad como por presentar características de interés para usos específicos (alimentación humana, industria nutracéutica, cosmética o producción de goma) o adaptativo,
- detectar duplicidades o sinonimias,
- análisis entre materiales recolectados en poblaciones silvestres, de variedades tradicionales e híbridos y de variedades comerciales actuales (diferenciación, flujo génico, domesticación, etc.),

- facilitar información necesaria para establecer prioridades de conservación dentro del programa,
- disponer de información requerida para general fichas varietales,
- establecer la huella genética para la eventual protección (derechos de obtentor) de cultivares locales

Esta etapa se subdividió en tres bloques complementarios centrados en una caracterización morfológica, una caracterización bromatológica y una caracterización genética, de acuerdo con protocolos estandarizados y replicables, facilitando la comparación entre accesiones y su posible incorporación a bancos nacionales o internacionales.

Caracterización morfoanatómica

Se utilizaron los descriptores estandarizados propuestos por el IPGRI (*The International Plant Genetic Resources Institute*) y por otros trabajos de recuperación de materiales vegetales silvestres (Kafkas *et al.*, 2002). La caracterización morfoanatómica de las accesiones mediante caracteres cuantitativos y cualitativos (Tabla 3.4) ha permitido describir y cuantificar rasgos fenotípicos del árbol, en particular de los frutos y semillas, con el fin de distinguir y clasificar las diferentes accesiones (Fig. 3.9). Esta caracterización se realizó sobre un mínimo de 10 a 30 frutos por accesión, seleccionados éstos de forma aleatoria pero representativa. En la tabla 3.5 se ofrecen los valores promedio estimados en base a las mediciones de las muestras de todos los individuos.

Figura 3.9. Caracterización fenotípica de un cultivar hembra y de otro macho (forma del fruto, características de la hoja y conformación de la inflorescencia).



Caracterización bromatológica

El objetivo de la caracterización bromatológica ha sido analizar la composición química de la pulpa de la vaina (harina de algarroba), para identificar accesiones con propiedades alimentarias, funcionales o industriales destacadas (ej., edulcorantes naturales, fibra, antioxidantes) (Fig. 3.10; Tabla 3.6). Se trata de una información fundamental para la caracterización de individuos prometedores (Ayache *et al.*, 2021; Moumou *et al.*, 2023; Baslam *et al.*, 2025). El procedimiento analítico fue por vía química siguiendo los protocolos establecidos para la especie (Moumou *et al.*, 2023).

Tabla 3.4. Parámetros medidos para la caracterización morfoanatómica de las accesiones de frutos y semillas.

Variables	Definición	Unidad	Forma de medición
Longitud del fruto	Distancia desde la base hasta el ápice del fruto	mm	Medición con calibrador digital
Ancho del fruto	Distancia máxima transversal del fruto	mm	Medición con calibrador digital
Grosor del fruto	Espesor medio del fruto	mm	Medición con calibrador en la parte media del fruto
Peso del fruto	Peso total del fruto	g	Pesado en balanza de precisión
Color del fruto	Color externo del fruto maduro	-	Observación visual
Número de semillas	Cantidad total de semillas por fruto	número	Conteo manual
Longitud de la semilla	Distancia desde la base hasta el ápice de la semilla	mm	Medición con calibrador digital
Ancho de la semilla	Distancia máxima transversal de la semilla	mm	Medición con calibrador digital
Grosor de la semilla	Espesor medio de la semilla	mm	Medición con calibrador digital
Peso de la semilla	Peso de una semilla individual	g	Pesado en balanza de precisión
Color de la semilla	Color externo de la semilla	-	Observación visual
Forma de la semilla	Descripción cualitativa de la forma	-	Observación visual
Índice de forma	Relación longitud/ancho de la semilla	adimensional	Cálculo a partir de mediciones directas

Tabla 3.5. Características morfoanatómicas promedio de frutos y semillas de algarrobo procedentes de poblaciones naturales en Andalucía (El Chami, 2025).

Variables	Promedio $\pm$ Desvío estándar	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variación (%)
Longitud de la algarroba (mm)	144,45 $\pm$ 33,44	57	225	23,15
Ancho de la algarroba (mm)	18,09 $\pm$ 3,01	10,08	26,15	16,64
Espesor de la algarroba (mm)	7,43 $\pm$ 1,92	2,3	12,83	25,81
Peso de la algarroba (g)	11,58 $\pm$ 5,41	1,27	30,72	46,75
Peso de la pulpa (g)	10,3 $\pm$ 2,78	4,5	16,5	26,94
Peso de semillas por algarroba (g)	1,71 $\pm$ 0,61	0,15	3,57	35,51
Número de semillas por algarroba	9,79 $\pm$ 4,97	1,33	27,7	50,76
Rendimiento en semillas (%)	16,52 $\pm$ 6,58	1,59	37,38	39,86
Longitud de las semillas (mm)	9,29 $\pm$ 1,08	6,24	11,96	11,64
Ancho de las semillas (mm)	6,91 $\pm$ 0,85	4,53	9,06	12,31
Espesor de las semillas (mm)	4,18 $\pm$ 0,49	2,84	5,4	11,8
Peso de cada semilla (g)	0,199 $\pm$ 0,038	0,111	0,299	19,243

Figura 3.10. Preparación de muestras para el análisis químico de la pulpa de algarrobo.



Tabla 3.6. Parámetros medidos para la caracterización química de frutos y semillas de algarrobo.

Característica	Definición	Unidad	Forma de medición
Contenido de azúcares totales	Cantidad total de azúcares presentes en el fruto	% peso seco	Cromatografía
Contenido de glucosa	Concentración de glucosa en el fruto	% peso seco	Cromatografía
Contenido de fructosa	Concentración de fructosa en el fruto	% peso seco	Cromatografía
Contenido de sacarosa	Concentración de sacarosa en el fruto	% peso seco	Cromatografía
Contenido de polisacáridos	Presencia de compuestos como galactomananos en la semilla	% peso seco	Análisis químico mediante hidrólisis y espectrofotometría
Contenido de proteínas	Cantidad total de proteínas presentes	% peso seco	Método de Kjeldahl
Contenido de lípidos	Cantidad total de grasas presentes	% peso seco	Extracción con solventes (Soxhlet)
Contenido de fibra	Fracción no digerible de origen vegetal	% peso seco	Método enzimático-gravimétrico
Contenido de fenoles totales	Cantidad total de compuestos fenólicos	mg ácido gálico eq. g ⁻¹	Espectrofotometría
Actividad antioxidante	Capacidad para neutralizar radicales libres	% inhibición o μmol TE g ⁻¹	Método DPPH
Contenido de humedad	Cantidad de agua presente	%	Secado en estufa a 105°C hasta peso constante
Contenido de cenizas	Residuo inorgánico después de la calcinación	% peso seco	Incineración en mufla a 550°C

Simultáneamente a los análisis indicados, se realizaron medidas con espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS, por sus siglas en inglés: *Near Infrared Reflectance Spectroscopy*) en el Servicio Centralizado de Apoyo a la Investigación (SCAI-UCO), para la determinación simultánea de varios parámetros bromatológicos relevantes (ej., contenido de humedad, proteína, azúcares solubles, fibra, lípidos, cenizas y otros compuestos de interés como los polifenoles y la actividad antioxidante) (Grassi *et al.*, 2021). Esta técnica es especialmente útil en los procesos de control de calidad industrial, pero en el contexto de este trabajo facilita la detección de individuos de interés para programas de mejora, ya que permite el análisis de grandes volúmenes de muestras con un mínimo de preparación y sin destrucción del material utilizado. El conjunto de la información química registrada quedó almacenado en la base de datos de referencia de las accesiones.

Caracterización genética

El genotipado molecular es una herramienta clave en los programas de caracterización y conservación de recursos genéticos. Esta caracterización consiste en determinar las variantes genéticas (alelos) presentes en las muestras recolectadas mediante técnicas moleculares. A diferencia de la caracterización morfológica y bromatológica antes descritas, que depende del ambiente, el genotipado revela información hereditaria estable.

El genotipado de los materiales recolectados dentro del proyecto QUERAT se está realizando en colaboración con el Grupo de Investigación de Bioquímica, Proteómica y Biología de sistemas vegetal y agroforestal (AGR-164) (Fig. 3.11) aplicando diferentes técnicas de análisis del DNA. Estos estudios están encaminados a: i) explorar la diversidad genética y la estructura poblacional de algarrobo en Andalucía, ii) identificar genes clave involucrados en procesos como la resistencia al estrés,

la producción de galactomanano o la regulación de la sexualidad, y iii) asociar las variaciones genéticas detectadas con rasgos agronómicos y adaptativos (como la resistencia a la sequía o la mejora en la producción de semillas con mayor contenido de galactomanano) mediante un GWAS (análisis de asociación del genoma completo, en inglés Genome-Wide Association Study).

Como se ha indicado en el capítulo 2, los resultados preliminares del análisis efectuado con ocho EST-SSR (Etiqueta de Secuencia Expresada-Repetición de Secuencia Simple) muestran que las poblaciones de Sevilla y Almería presentan una estructura similar, al igual que las de Córdoba y Cádiz, mientras que Granada y Almería presentan una estructura genética ligeramente diferente del resto.

Figura 3.11. Extracción de ADN para la caracterización de los diferentes árboles y variedades mediante técnica de microsatélites.



3.3.4. Conservación

La conservación genética puede clasificarse en dos enfoques complementarios: conservación dinámica y conservación estática. La diferencia clave radica en si se permite o no la evolución genética del material conservado.

La conservación dinámica de recursos genéticos permite la reproducción, recombinación y evolución natural de las poblaciones, es decir que promueve la adaptación continua a cambios ambientales, plagas y enfermedades y la coevolución con otros organismos del ecosistema. Esta estrategia se realiza principalmente *in situ*, es decir en el hábitat natural o, como se verá a continuación, en agroecosistemas. En el caso del algarrobo, se trataría de conservar poblaciones naturales de interés desde el punto de vista de sus características genéticas; por ejemplo, por presentar adaptaciones singulares o por mostrar rasgos productivos superiores.

En el ámbito de las especies cultivadas, también se reconoce una forma dinámica, denominada conservación *on-farm*, si bien los recursos genéticos no se mantienen en su entorno natural, sino en fincas o en explotaciones agrícolas. En este tipo de conservación se combinan elementos de conservación *in situ* y *ex situ*, ya que los recursos genéticos no están en su entorno natural (propio de la conservación *ex situ*) pero se permite el cultivo continuado, el manejo y la evolución de variedades tradicionales en las condiciones ambientales y culturales locales, promoviendo su adaptabilidad y su valor de uso (propio de una conservación *in situ* dinámica). En este enfoque se promueve la diversidad funcional y cultural, favorece la resiliencia agrícola frente al cambio climático y permite el mantenimiento de variedades locales por parte de los agricultores, donde las plantas siguen evolucionando bajo selección natural y humana. Desde el punto de vista social, esta práctica promueve la participación activa de los agricultores en la preservación de los sistemas tradicionales y en las acciones de innovación.

La conservación estática de recursos genéticos implica que no hay evolución, es decir que el material genético no se reproduce ni evoluciona. Se realiza principalmente *ex situ*, es decir, fuera de su entorno natural. Esta estrategia es muy útil para preservar individuos singulares en determinados rasgos, genes raros, líneas puras o materiales base para mejora, ya que permite conservar material genético a largo plazo y facilita el acceso a los mismos para investigación y para la mejora genética; también permite el mantenimiento de materiales a corto o medio plazo para su uso sostenible en acciones de restauración o multiplicación con fines comerciales; y, por último, permite preservar material valioso que puede desaparecer en el sitio en el que vegetan por la existencia de fuertes presiones de origen natural o antrópico. La forma más común de conservación *ex situ* es el almacenamiento de semillas en bancos de germoplasma, y también de ADN, tejidos o embriones conservados en criopreservación, así como clones de árboles mantenidos en colecciones vivas. La preservación de semillas de algarrobo en bancos de germoplasma es un caso paradigmático de conservación de estática *ex situ* de los recursos genéticos de esta especie. Es posible y económico usar esta técnica para el algarrobo, ya que sus semillas tienen un comportamiento ortodoxo, es decir que pueden conservarse en condiciones adecuadas durante largo tiempo sin perder viabilidad.

También se aplica una conservación estática *in situ* cuando se mantienen los recursos genéticos en su ambiente natural o agroecosistema original, pero sin permitir su evolución o cambio genético continuo. Es decir, se conserva la diversidad existente, pero no se busca que siga evolucionando bajo presiones naturales o de selección humana. Esta estrategia busca preservar el material genético tal como está, sin modificarlo y es útil para proteger variedades raras o con riesgo de desaparecer y cuya evolución podría poner en riesgo su identidad genética.

En el ámbito de la iniciativa para la conservación de los recursos genéticos del algarrobo en Andalucía, se ha primado el enfoque de conservación estática, tanto en su forma *in situ* como *ex situ*, debido a que el objetivo principal es el rescate de cultivares de interés real o potencial, principalmente por sus rasgos agronómicos y adaptativos. En lo que respecta a las acciones incluidas como “conservación *in situ*”, se es consciente que, en sentido estricto, sólo se aplicaría este concepto a aquellas que afectan a los ejemplares localizados en su ambiente natural originario (árboles de poblaciones naturales), y que, para el resto de los ejemplares de los que se desconoce su origen, estas acciones no serían estrictamente *in situ*. Al respecto, teniendo en cuenta que la domesticación del algarrobo ha sido predominantemente local (Baumel *et al.*, 2022), por lo que, en todo caso, la preservación de estos individuos respondería mejor al concepto de “conservación *circa situ*”, es decir cerca de su hábitat natural, pero bajo condiciones gestionadas. Para simplificar, dado que ambas estrategias *in situ* y *circa situ* comparten el mismo protocolo de actuación, éstas se presentan bajo la denominación genérica de conservación *in situ*.

El material conservado se gestiona conforme al Tratado Internacional sobre los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura y al Protocolo de Nagoya, iniciativas implementadas en España, respectivamente, por el Real Decreto 429/2020 para los recursos para la agricultura y la alimentación y por el Real Decreto 124/2017 en lo que respecta a los recursos silvestres.

Conservación *in situ*

La conservación *in situ* representa un pilar estratégico para la preservación de la diversidad genética del algarrobo en Andalucía en su contexto agroecológico original

(López *et al.*, 2008; Valenzuela Lozano, 2023). Se ha elegido esta opción para preservar árboles adultos longevos, aislados o situados en pequeñas poblaciones que constituyen un recurso genético singular, muestran rasgos de interés para su uso (precocidad, tolerancia a sequía, elevada calidad de pulpa, etc.) o se presentan como un patrimonio cultural valioso. Así, en las prospecciones realizadas en la primera fase del programa, descrita en el apartado 3.3.1 de este documento, se identificaron y seleccionaron árboles que reunieran alguno de los siguientes criterios:

- cultivos tradicionales no documentados previamente,
- árboles cuyo fenotipo presenta rasgos agronómicos deseables,
- árboles singulares por su valor histórico-cultural,
- ejemplares silvestres localizado en zonas con bajo nivel de intervención agrícola reciente.

En total se seleccionaron 209 árboles para su conservación *in situ*. Cada uno de ellos ha sido caracterizado con diferentes datos, generándose posteriormente un inventario de árboles de conservación *in situ* e integrado en un SIG. Los datos consignados para cada árbol son, básicamente, los siguientes: código biunívoco de la unidad, fecha de caracterización, datos de localización, descripción fenotípica, estado de conservación y amenazas, superficie de la zona núcleo de conservación y la zona tampón.

En colaboración con la Red de Viveros de Andalucía de la Consejería de Sostenibilidad y Medio Ambiente (Junta de Andalucía), se ha establecido un protocolo de gestión para garantizar la conservación de los árboles. Esta iniciativa incluye prácticas agronómicas adaptadas, como podas de formación, control biológico de plagas, reducción del uso de fitosanitarios y protección del entorno inmediato.

El proyecto QUERAT dio inicio a la firma de convenios de custodia entre la Universidad de Córdoba y los propietarios de los terrenos donde se encuentran los individuos objeto de conservación *in situ*. Estos acuerdos, de carácter voluntario, establecen compromisos básicos de gestión de los ejemplares. Entre otros, cabe destacar: i) el mantenimiento del árbol y cuidado básico del ejemplar evitando prácticas de gestión agresivas (podas severas, actuaciones en el entorno que comprometan la salud del árbol, etc.) o que modificaran las características genéticas del ejemplar (injertado con otras variedades); ii) posible cesión de material vegetal para fines científicos o de multiplicación. A cambio, el custodio se beneficia de una asistencia técnica especializada, de su participación indirecta de proyectos de reproducción en vivero o de usos industriales, de su inclusión en redes de productores de variedades tradicionales y de una gestión agroecológica de los árboles conservados.

Está previsto promover la creación de redes locales de conservación (redes de agricultores custodios) en colaboración con grupos de desarrollo rural y cooperativas. Estas redes facilitan el intercambio de experiencias, la formación técnica, la promoción de productos derivados y el fortalecimiento del valor añadido del cultivo. Ya se han realizado jornadas de divulgación al respecto.

La Universidad de Córdoba mantiene visitas periódicas para verificar el estado de los árboles, la evolución de sus características fenotípicas y su nivel de conservación. Hasta la fecha de publicación de este documento, no se ha producido pérdida de individuos conservados *in situ*.

Conservación *ex situ*

Tras la recolección y caracterización preliminar ya descritos, el germoplasma elegido para su conservación *ex situ* se conserva en una colección activa que incluye un banco de semillas y dos bancos clonales.

Banco de semillas

Los lotes de semillas obtenidos como parte del proceso de caracterización de los individuos promisorios se procesaron mediante una limpieza mecánica, un cribado por tamaño y un secado controlado en un ambiente a una humedad relativa inferior al 15 %.

Las semillas se conservan en envases herméticos, almacenadas a 4 °C y una humedad relativa del 10 – 15 % para evitar la pérdida de viabilidad (Fig. 3.12). De cada lote, se hizo una analítica de referencia de su calidad inicial. Está previsto realizar controles periódicos de viabilidad (cada 5 años), dado que, por el carácter ortodoxo de las semillas de algarrobo, no se prevé la pérdida rápida de su viabilidad. Cada lote de semillas se acompaña de una ficha de pasaporte que contiene: código de acceso, fecha y condiciones de recolección, datos localización del parental femenino, características morfológicas de los frutos y datos estándar de caracterización de lotes de semillas.

Colección clonal

De algunos de los individuos seleccionados para su conservación, teniendo en cuenta criterios fenotípicos y de origen geográfico, se obtuvieron estacas sanas, sin necrosis, grietas o deformaciones, para el establecimiento de colecciones clonales mediante injerto, que es la forma tradicional de propagación vegetativa del algarrobo (Fig. 3.13 y 3.14).

Se ha creado un banco clonal en el campus de Rabanales de la Universidad de Córdoba y otro en el Centro “Alameda del Obispo” del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica. Cada clon se ha repicado al menos 2 veces para asegurar la conservación del genotipo. Estos bancos clonales, además de su propósito principal de conservación, también permiten estudiar cómo las diferencias genéticas entre clones influyen en sus características fenotípicas, eliminando el efecto del ambiente. La colección clonal permite, a corto o largo plazo, conservar genotipos, efectuar selección clonal para caracteres de interés productivo o adaptativo (Fig. 3.15), suministrar materiales de reproducción para la producción de plantas con fines agronómicos, para programas de mejora o para la investigación, entre otros. Por ejemplo, los materiales conservados en el banco se están utilizando para poner a punto técnicas de multiplicación mediante injerto sobre patrones silvestres seleccionados por su tolerancia a la sequía o a la salinidad.

Se dispone de un sistema de trazabilidad para los genotipos conservados en los dos bancos clonales, con información relativa a su acceso hasta los materiales que se obtienen de ellos para su uso en vivero u otros destinos. En la actualidad se está poniendo a punto un sistema de consultas externas, solicitudes de material para investigación y uso del germoplasma. Todo intercambio de material se realiza mediante acuerdos tipo.



Figura 3.12. Acciones del banco de semillas de algarrobo de la Universidad de Córdoba.



Figura 3.13. Material para injerto de patrones en el banco de germoplasma del IFAPA de Córdoba y de la Universidad de Córdoba (izq.); individuo injertado en el banco de germoplasma del IFAPA en Córdoba (dcha.).



Figura 3.14. Injerto de púa en el banco de germoplasma de IFAPA de la Alameda del Obispo (Córdoba). estado inicial tras el injertado y desarrollo posterior.



Figura 3.15. Ensayos de resistencia a estrés hídrico de cultivares andaluces de algarrobo.

3.4. Catalogación de los cultivares tradicionales de algarrobo de Andalucía

Está previsto solicitar la inclusión en el Registro de Variedades Comerciales de los genotipos de mayor interés con el objetivo de facilitar el acceso a semillas y plantas de algarrobo más productivas, adaptadas a diferentes condiciones climáticas y edáficas. En concreto, para el algarrobo de Andalucía se pretende que sean reconocidas como variedades de conservación, incluyendo como tales variedades locales en riesgo de erosión genética o variedades adaptadas a condiciones agroecológicas específicas.

Para cumplir con el régimen jurídico de dicho registro, establecido por el Real Decreto 170/2011, para cada una de las variedades que se pretenden registrar se debe facilitar, entre otros, la propuesta de nombre varietal (se mantendría la referencia a los nombres de los cultivares locales, si existieran) y su descripción técnica (origen, características morfológicas, agronómicas, etc.). Además, se deben presentar pruebas de cumplimiento de los requisitos de diferenciación, homogeneidad y estabilidad (DHE); es decir, la variedad que se pretende registrar debe ser claramente distinta de cualquier otra variedad conocida en el momento de la solicitud, debe ser suficientemente uniforme en sus caracteres relevantes cuando se cultiva en condiciones similares y debe mantener sus características tras sucesivas multiplicaciones o ciclos de reproducción.

3.5. Acciones de difusión y relación con otras iniciativas

La difusión y transferencia de conocimientos adquiridos se consideró un proceso clave en el proyecto QUERAT con el fin de reintegrar este conocimiento en el medio productivo y social. Entre otras iniciativas, cabe destacar la distribución catálogos impresos y digitales de variedades tradicionales y los talleres con agricultores sobre propagación y manejo del algarrobo (Fig. 3.16).

Se pretende integrar las colecciones de algarrobo de Andalucía en la Red de Colecciones del Programa Nacional de Conservación y Utilización Sostenible de los Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación; red coordinada por el Centro Nacional de Recursos Fitogenéticos del INIA-CSIC (CRF) por mandato de la Ley 30/2006. Dicho centro mantiene, actualiza y publica el Inventario Nacional de Recursos Fitogenéticos

En lo que respecta a la norma de conservación de recursos genéticos forestales, desarrollada en el Real Decreto 159/2022 y sus planes y redes asociadas, las acciones de conservación *ex situ* del algarrobo en Andalucía tendrían su cabida en el Banco de Germoplasma Forestal en Red. La integración de la conservación *in situ* de ejemplares de algarrobo en el Registro nacional de unidades de conservación *in*

Figura 3.16. Jornadas de viverismo de algarrobo del Grupo Operativo QUERAT.



situ creado por dicha norma presenta un difícil encaje, dado el carácter de conservación dinámica exigido para ello por la norma. La integración de las unidades *in situ* de algarrobo definidas en esta iniciativa como individuos (genotipos) concretos tiene difícil encaje en el Registro nacional de unidades de conservación genética *in situ*, creado por el Real Decreto 159/2022. Al respecto, debe tenerse en cuenta que esta norma exige un tamaño mínimo poblacional y la conservación dinámica de las unidades. Este tipo de conservación implica que las poblaciones deben mantenerse activas en su entorno natural, con capacidad de regenerarse y evolucionar genéticamente.

Se estudiará la posibilidad de duplicar toda o parte de la colección de semillas de algarrobo del proyecto Querat en el Banco de Germoplasma Vegetal Andalúz (BGVA), que forma parte, a su vez, de la Red Española de Bancos de Germoplasma de Plantas Silvestres (REDBAG).

Por otra parte, se ha procurado recoger la información recogida en nuestra inciativa en una base de datos compatible con los estándares de otras iniciativas europeas y mundiales, como EURISCO (Home) o GENESYS (<https://www.genesys-pgr.org/>).

Bibliografía

- Alía, R., García del Barrio, J.M., Iglesias Sauce, S., Mancha Nuñez, J.A., de Miguel y del Ángel, J., Nicolás Peragón, J. L., Pérez Martín, F., Sánchez de Ron, D. (2009). Regiones de procedencia de especies forestales en España. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid. 363 pp.
- Ayache, S.B., Reis, F.S., Dias, M.I., Pereira, C., Glamočlija, J., Soković, M., Achour, L. (2021). Chemical characterization of carob seeds (*Ceratonia siliqua* L.) and use of different extraction techniques to promote its bioactivity. *Food Chem.*, 351, 129263.
- Barbagallo, M., Di Lorenzo, R., Meli, R., Crescimanno, F. (1997). Characterization of carob germoplasm (*Ceratonia siliqua* L.) in Sicily. *J. Hort. Sci.* 72(4), 537-543.
- Barceló, M.; Pou, J., Llopart, M.; Luna, J.M.; Gálvez, I., Garau, M.C. (2023). Physicochemical description of traditional *Ceratonia siliqua* L. cultivars. 7th International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering. Marsella. Francia. (Póster).
- Barceló-Anguiano, M., Llopart, M., Pou, J., Luna, J., Garau, M. C. (2024). Agronomical and Morphological Diversity of Carob (*Ceratonia Siliqua* L.) Cultivars: A Case of a Semi-arid Region in Majorca (Spain). Preprinter.
- Barracosa, P., Caetano, I., Batista, M.T. (2009). Avaliação do rendimento agroindustrial dos frutos e sementes de cultivares de alfarrobeira (*Ceratonia siliqua* L.) no Algarve. *Millenium*, (37), 11.
- Barracosa, P., Osorio, J., Cravador, A. (2007). Evaluation of fruit and seed diversity and characterization of carob (*Ceratonia siliqua* L.) cultivars in Algarve region. *Sci Hortic*, 114(4), 250-257.
- Baslam, A., Kabdy, H., Dilagui, I., Elhamzaoui, M., Chait, A., Garzoli, S., Baslam, M. (2025). Phytochemical Screening, Physicochemical Profiling, and Bioactivity Assessment of *Ceratonia Siliqua* Seed Aqueous Extract: Antioxidant and Antimicrobial Properties. *Food Anal. Methods*, 1-14.
- Battle, I., Tous, J. (1994). Carob germoplasm in Andalusia. *NUCIS Newsletter* 2, 10-11.
- Baumel, A., Nieto Feliner, G., Médail, F., La Malfa, S., Di Guardo, M., Bou Dagher Kharrat, M., Fatma Lakhal-Mirleau, F., Frelon, V., Ouahmane, L., Diadema, K., Sanguin, H., Viruel, J. (2022). Genome-wide footprints in the carob tree (*Ceratonia siliqua*) unveil a new domestication pattern of a fruit tree in the Mediterranean. *Mol. Ecol.*, 31, 4095-4111.
- Bolaric, S., Müller, D., Vokurka, A., Cepo, V., Ruscic, M., Srećec, S., Kremer, D., (2021). Morphological and molecular characterization of Croatian carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) germplasm. *Turk J Agric For.*, 45(6), 807-818.
- Bosh, J., García del Pino, F., Ramoneda, J., Retana, J. (1996). Fruiting phenology and fruit set of carob *Ceratonia siliqua* L. (Cesalpiniaceae). *Israel J. Plant Sci.* 44, 359-368.
- Boublenza, I., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasaï, F., Chemat, F. (2019). Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations. Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *Sci Hortic*, 256, 108537.
- Di Guardo, M., Scollo, F., Ninot, A., Rovira, M., Hermoso, J.F., Distefano, G., Battle, I. (2019). Genetic structure analysis and selection of a core collection for carob tree germplasm conservation and management. *Tree Genetics Genom.*, 15(3), 41.
- El Chami, M.A. (2025). Diversity assessment of the semi-natural Lebanese carob germplasm in comparison to western Mediterranean carob varieties and evaluation for resilience to drought. Tesis doctoral, Universidad de Córdoba.
- El Kahkahi, R., Zouhair, R., Diouri, M., Ait Chitt, M., Errakhi, R. (2015). Morphological and biochemical characterization of Morocco carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Int J Biol Med Res*, 6(2), 4946-4952.
- EUFORGEN (2021). Forest Genetic Resources Strategy for Europe. EUFORGEN Publication Home.

- Garau, M.C.; Barceló, M.; Pozo, J.; Llompарт, M.; Luna, J.M. (2022). El rescate de variedades nativas como instrumento para afrontar el cambio climático. VIII Jornadas de Medio ambiente de las Islas Baleares. Ed. Sociedad de Story Natural de las Islas Baleares. ISBN 978-84-09-45184-5.
- Giovino, A., Marchese, A., Bonanno, F., Sala, G., Marra, F. P., Domina, G. (2023). Morphological and molecular characterization of Sicilian carob (*Ceratonía siliqua* L.) accessions. *Caryologia*, 76(3), 39-49.
- Grassi, S., Jolayemi, O. S., Giovenzana, V., Tugnolo, A., Squeo, G., Conte, P., Alamprese, C. (2021). Near infrared spectroscopy as a green technology for the quality prediction of intact olives. *Foods*, 10(5), 1042.
- Groske Díaz, V. (2016). Caracterización morfológica y agronómica del algarrobo (*Ceratonía siliqua*). Instituto de Investigación y Formación Agroalimentaria y Pesquera de las Islas Baleares (IRFAP).
- Kafkas, S., Kafkas, E., Perl-Treves, R. (2002). Morphological diversity and a germplasm survey of three wild *Pistacia* species in Turkey. *Genet Resour Crop Evol*, 49(3), 261-270.
- López, P., González, J. M., Soriano, J. J., Camarillo, J. M. (2008). Recursos genéticos de interés agroecológico en Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, Sevilla.
- Menconi, M.E., Abbate, R., Grohmann, D. (2024). Exploring the uses and landscape value of *Ceratonía siliqua* L.: a systematic review. *For. Trees and Livelihood*, 33(3), 231-247.
- Millán, J.G., Berlanga, Á.Q., Arriaga, M.A., Gallo, B.A., Soldevilla, C.G., Madrid, R.B., Rodríguez, J.M. (2015). Algarrobo (*ceratonía siliqua*, l.) en dehesas de Sierra Morena: Abundancia poblacional y dispersión endozoócora. In *Pastos y Forrajes en el siglo XXI* (pp. 341-348). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.
- Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (2024). Plan Nacional de conservación de recursos genéticos forestales. MITECO, Madrid.
- Mithun, V., Pradeep Kumar, S., Pradeep, N.S. (2023). Conservation of RET Plants: Strategies and Plans. In *Conservation and Sustainable Utilization of Bioresources* (pp. 353-372). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Moumou, M., Mokhtari, I., Milenkovic, D., Amrani, S., Harnafi, H. (2023). Carob (*Ceratonía siliqua* L.): A comprehensive review on traditional uses, chemical composition, pharmacological effects and toxicology (2002-2022). *J. Biol. Act. Prod. Nat*, 13(3), 179-223.
- Mouniane, Y., Chriqui, A., El-Khadir, I., Hbyaj, K., Rochd, A., Aitouhanni, I., Hmouni, D. (2024). Assessing Morphological Trait Variability in Moroccan Carob (*Ceratonía siliqua* L.) Ecotypes for Adaptive Breeding in Response to Climate Change and Sustainable Food Security. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 109, p. 01040). EDP
- Naghmouchi, S., Khouja, M. L., Romero, A., Tous, J., Boussaid, M. (2009). Tunisian carob (*Ceratonía siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Sci Hortic*, 121(2), 125-130.
- QUERAT (2024) Informe final Grupo Operativo QUERAT. Universidad de Córdoba.
- Rodríguez, J., Frutos, D. (1988). Primeros estudios sobre las poblaciones de algarrobo (*Ceratonía siliqua* L.) en el Sureste y Sur de España. En: *Proceedings of the II International Carob Symposium* (Fito P., Mulet A., eds.). Valencia, Spain. pp. 255-267.
- Rosúa, J.L., López de Hierro, L., Martín, J.C., Serrano, F., Sánchez, A. (2001). Procedencias de las especies vegetales autóctonas de Andalucía utilizadas en restauración de la cubierta vegetal. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.
- Rovira, M.c, Aletà, N.; Ninot, A., Batlle, I. (2014). Bancos de Germoplasma de frutos secos y desecados: avellano, nogal y algarrobo. IRTA-Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (Tarragona).
- Sánchez-Lancha, A. (2003). Árboles y arboledas singulares de Andalucía: Córdoba. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla. 200 pp.

Taberner, C. G., Perelló, M. B., Pou, J., Cifre, M. L., Prohens, J. M. L. (2023). El rescat de varietats natives com a instrument per afrontar el canvi climàtic. In VIII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears: Ponències i comunicacions (pp. 526-529). Societat d'Història Natural de Balears.

Talhok, S. N., Van Breugel, P., Zurayk, R., Al-Khatib, A., Estephan, J., Ghalayini, A., Lychaa, D. (2005). Status and prospects for the conservation of remnant semi-natural carob *Ceratonia siliqua* L. populations in Lebanon. *Forest Ecol. Manag.*, 206(1-3), 49-59.

Tetik, N., Turhan, I., Oziyci, H.R., Gubbuk, H., Karhan, M., Eecisli, S. (2011). Physical and chemical characterization of *Ceratonia siliqua* L. germplasm in Turkey. *Sci Hortic*, 129(4), 583-589.

Tous, J., Battle, I., Romero, A. (1995). Prospection de variedades de algarrobo en Andalucía. *ITEA-Inf. Tec.*, 91, 164-174.

Valenzuela Lozano, A. (2023). Diseño de una red de reservas genéticas para la conservación in situ del acebuche en España. Tesis doctoral, Universidad de Rey Juan Carlos.

Vardar, Y., Secmen, O., Öztürk, M. (1980). Some distributional problems and biological characteristics of *Ceratonia* in Turkey. *Portug. Acta Biol.* 16(1-4), 75-86.

4. El cultivo de plantas de algarrobo de alta calidad funcional

**Rafael M.^a Navarro Cerrillo
Antonio Ángel García Mayoral
Guillermo Palacios Rodríguez
Francisco José Ruiz Gómez
Roberto J. Cabrera Puerto
Mohamad Ali El Chami**

4.1. Introducción

Durante los últimos años, el conocimiento sobre viverística forestal ha experimentado un desarrollo significativo, tanto en lo que respecta a la obtención y conservación de los materiales forestales de reproducción, como de las técnicas para la producción de planta forestal con una calidad morfofisiológica adecuada. Estas contribuciones, procedentes de numerosas investigaciones y trabajos aplicados, deben recogerse y presentarse de forma que puedan ser utilizadas fácilmente por los operadores profesionales dedicados a las actividades de producción de planta forestal.

Al respecto, debe tenerse en cuenta que, en todo caso y para el éxito de la plantación, es imprescindible utilizar materiales adecuados al objetivo prioritario de ésta y, también, adaptados a las condiciones del sitio de implantación. Por lo tanto, un buen proceso de producción de plantas en vivero requiere considerar distintos aspectos que definen la calidad de los materiales de reproducción, desde su calidad genética hasta su calidad exterior, pasando por su calidad fisiológica.

De acuerdo con la normativa que afecta a la producción de vegetales, se considera materiales de reproducción cualquier estructura biológica a partir de la cual se puede obtener un nuevo individuo. En concreto, la norma de comercialización de materiales forestales de reproducción recoge como tales a los frutos, las semillas, las partes de plantas y las plantas. La elección del tipo de material está condicionada por la forma en la que se pretende implantar la especie en el terreno (por ejemplo, por siembra directa o mediante plantación de partes de plantas o de plantas), que, a su vez, dependerá de las características de la especie y su biología reproductiva. Conocer las posibilidades que ofrece una especie respecto de los materiales de reproducción que pueden utilizarse para su implantación en el terreno es, por tanto, un primer paso esencial para obtener resultados satisfactorios, tanto en el proceso productivo como en las características de la futura plantación. En el caso del cultivo del algarrobo, se suelen utilizar dos estrategias: i) el establecimiento en campo de plantas obtenidas a partir de semillas, es decir mediante la obtención de plantas de vivero vía reproducción sexual, y ii) el uso de partes de plantas para el injertado de genotipos de interés para dicho objetivo, es decir mediante propagación vegetativa, si la plantación tiene un objetivo de producción de frutos.

La facilidad de germinación y de desarrollo en vivero puede llevar a pensar que el cultivo del algarrobo no presenta dificultad; sin embargo, su tendencia al crecimiento descompensado en altura (elevada esbeltez), el escaso desarrollo de raíces secundarias que formen un cepellón consistente y su susceptibilidad a las bajas temperaturas hacen que, con frecuencia, su cultivo se complique. Así, en la práctica, se observan lagunas en lo que respecta a la forma en cómo deben producirse y a las condiciones mínimas de calidad que han de cumplir las plantas para su comercialización. Muchos de estos conocimientos son poco conocidos y su aplicación no se ha generalizado en la gestión de un gran número de viveros comerciales.

Por ello, en este capítulo se pretende ofrecer el estado del conocimiento sobre aspectos prácticos para la adecuada selección y manejo en vivero de los materiales de reproducción de esta especie, desde la obtención y conservación de los frutos y las semillas, hasta la producción de plantas de vivero, teniendo en cuenta que estas últimas son las habitualmente utilizadas para el establecimiento de la especie en campo.

4.2. Obtención de frutos y semillas y germinación

La colecta de los frutos de algarrobo se realiza según zonas, entre julio a octubre, en función del estado de maduración de la algarroba, que puede variar mucho, incluso dentro del mismo árbol. El momento más adecuado es cuando el fruto presenta un color marrón oscuro y consistente. Se consigue así, por un lado, limitar la pérdida de germinación, y por otro, minimizar el tiempo en el que los frutos están en contacto con el suelo. La cosecha se efectúa por vareo y recogida del suelo, para lo que conviene extender una malla, o cortando las legumbres directamente del árbol.

La producción de frutos por árbol es muy variable, tanto entre distintos ejemplares en un mismo año como en un mismo ejemplar entre años diferentes. Los valores medios de producción de fruto oscilan entre 15 y 60 kg árbol⁻¹, aunque en ocasiones se han recogido hasta 135 kg árbol⁻¹ (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Producción de algarrobas por árbol en plantaciones y bosques mediterráneos.

kg frutos/ árbol	Formación	Localización	Variedad	Referencia
50 - 70	Plantación	Tarragona	-	Battle y Tous, 1997
100 - 200	Individuo	-	-	Battle y Tous, 1997
7,7 - 28,5	Plantación	Algarve	Mulata y Galhosa	Correia et al., 2017
7,4 - 40,3	Plantación	Algarve	Mulata	Correia y Pestana, 2018
263 - 483	Plantación	Chefchaouen (Marruecos)	Lanta y Dkar	Gharnit et al., 2006
40 - 65	Plantación	Chefchaouen (Marruecos)	Lanta y Dkar	Gharnit et al., 2006
30 - 120	-	-	-	Guillén et al., 2018
70	Plantación	-	-	Tous, 1984
60 - 120	Plantación	-	-	Tous, 1984
13,3 - 48,8	Plantación	Tarragona	Sayalonga y Aida	Tous Martí, 2024
67 - 95	Plantación	Tarragona	Matalafera y Duraíó	Tous Martí, 2024

Si se van a utilizar las semillas para la producción de plantas, hay que extraerlas de los frutos con cierta rapidez, ya que la pulpa tiende a endurecerse. En caso de que el uso de las algarrobas sea para la comercialización de pulpa y semillas, es posible el almacenamiento de la vaina completa. La extracción de las semillas es complicada, tanto por la dificultad que conlleva la rotura de la legumbre como la separación de las semillas. Se realiza mediante trillado, cribado y separación

por método densimétrico. Con los métodos de limpieza empleados usualmente, la pureza de los lotes de semillas puede ser muy elevada (más del 90 %), con un rendimiento en semilla entre el 8-25 % (Tabla 4.2; Navarro-Cerrillo y Gálvez, 2001; Pérez-García, 2009).

Tabla 4.2. Resultados de caracterización de lotes de semillas (fuente: Navarro-Cerrillo y Gálvez, 2001).

Rendimiento semilla / fruto (% en peso)	Pureza (%)	Facultad germinativa (%)	Nº semillas kg ⁻¹
15 - 25	95 - 98	70 - 80	4.500 - 5.200 - 5.600
	98 - 99		5.215 - 5.681
5 - 14		(80)	4.400 - 5.500
	93 -100	74 - 98	400 - 6.200
8 - 16	95-98	65 - 90	5.000 - 5.600

Las semillas presentan un comportamiento ortodoxo, pues son tolerantes a la desecación, por lo que pueden mantenerse almacenadas durante bastante tiempo. Al menos durante los 18 primeros meses tras su obtención su viabilidad no se ve alterada por la temperatura y otras condiciones de conservación; por ello, admite un almacenaje sin condiciones especiales (Piotto y Piccini, 1996).

Las semillas de algarrobo presentan una cutícula dura e impermeable, que limita el proceso de germinación. Sin embargo, con un adecuado tratamiento, las tasas de germinación suelen ser elevadas (Fig. 4.1). Los mejores resultados se han obtenido sumergiendo las semillas en agua hirviendo y dejándolas enfriar posteriormente en dicha agua, proseguido de una fase de pregerminación en lecho húmedo con fungicida durante 15 días para su consiguiente siembra directa, una vez aparece el meristemo apical de la radícula. Con este método se obtienen valores de germinación de hasta el 95 - 100 %, dependiendo de la variedad y la procedencia de las semillas. También se obtienen buenas tasas de germinación por inmersión en una solución al 80 % de ácido sulfúrico durante 30 minutos (germinación 99 %) dejándolas posteriormente en agua durante 24 horas (Frutos, 1988; Navarro Cerrillo y Gálvez Ramírez, 2001; Gunes *et al.*, 2013).



Figura 4.1. Semillas de algarrobo germinadas tras un tratamiento de escarificación.

La germinación es epigea y las plántulas, de 4 - 5 cm, tienen dos cotiledones oblongos, mostrando dos hojas primordiales algo acuminadas, de color rojizo y con los bordes enteros (Navarro Cerrillo y Gálvez Ramírez, 2001).

Las normas de la Asociación Internacional de Ensayos de Semillas (*International Seed Testing Association*) (ISTA, 2002) no incluyen un método normalizado para la realización de ensayos para la caracterización de lotes de semillas de algarrobo. Por otra parte, si bien el algarrobo no está regulado por la norma de comercialización de materiales forestales de reproducción (Real Decreto 289/2003), los criterios de calidad establecidos por esta norma deben ser extensible a esta especie: el contenido máximo en frutos y semillas de otras especies no debe superar el 1 % del peso del lote.

4.3. Producción de plantas

En un vivero se puede producir una amplia variedad de diferentes tipos funcionales de plantas. En la España mediterránea, los viveros de especies de interés agroforestal, como el algarrobo, hace años que optaron por la producción de plantas en envase, ya que este método de cultivo presenta notables ventajas. Así, su virtud principal radica en que se reduce el número de savias necesarias para lograr los criterios de calidad requeridos para las condiciones de plantación, acelera el crecimiento de las plantas, se mejora la arquitectura y el comportamiento del sistema radical y facilita la respuesta de las plantas a las prácticas de cultivo (por ejemplo, la fertilización o la uniformidad de los riegos). Debe tenerse presente que los viveros que producen plantas en contenedor pueden producir lotes para una amplia variedad de sitios de plantación, por lo que las características morfológicas, fisiológicas y genéticas de las plántulas deben conocerse y seleccionarse antes de iniciar el cultivo teniendo en cuenta su destino final (Fig. 4.2). Dado que no hay un tipo ideal de planta que se pueda utilizar para todos los fines, es responsabilidad del viverista asegurar la calidad funcional requerida para el destino final de las plantas y asegurar su trazabilidad hasta su entrega al usuario final. En este sentido, el viverista debe tener claro el



Figura 4.2. Plantación de algarrobo con riego en el IFAPA de Córdoba.

concepto de lote como conjunto de unidades de un solo producto, identificable por la homogeneidad de su composición y origen, y asumir dicho concepto en la gestión y el orden de su centro de producción.

En el caso de las plantaciones intensivas de algarrobo es fundamental lograr altas tasas de supervivencia, pero también de crecimiento. En cambio, en las plantaciones de algarrobo con objetivo de restauración, la supervivencia es, posiblemente, el principal factor que determina la calidad de la actuación. Algunos estándares de calidad de algarrobo existentes producen plántulas que sobreviven satisfactoriamente en campo, pero que tienen un crecimiento insuficiente o morfológicamente inadecuado, lo que da como resultado plantaciones que presentan un desarrollo deficiente. Esta realidad hace necesario establecer nuevos estándares de calidad de planta de vivero, que especifican

plántulas más grandes que son mejores para competir y crecer con éxito tras su plantación. Tanto el usuario final de la planta como el viverista tienen una responsabilidad compartida en el éxito de la plantación, por lo que deben trabajar de forma coordinada para definir el mejor tipo de plantas para un proyecto de plantación en particular. El usuario de las plantas debe especificar las características genéticas adecuadas (ej., con la elección del material de base), la calidad funcional esperada (ej., morfológica y fisiológica de las plantas), qué factores ambientales del sitio de establecimiento van a influir más en la plantación, sobre todo los más limitantes para la supervivencia y el crecimiento, y el objetivo de la plantación. Esta información de

partida permite definir qué características morfológicas (ej., altura, esbeltez, volumen radical) y fisiológicas (ej., nutrientes, resistencia a sequía, etc.) será necesario maximizar para el éxito de la plantación en un sitio en particular, y definir, así, la “planta tipo” (Fig. 4.3). A partir de la calidad de planta tipo definida, el viverista debe planificar las especificaciones para ese cultivo en particular, optimizando los protocolos de cultivo al menor costo.



Figura 4.3. Diferentes tipos de cultivo en vivero de plantas de algarrobo.

En el caso del algarrobo, se pueden definir tres plantas tipo según diferentes programas de cultivo (Tabla 4.3), cada una de ellas definida por unos determinados atributos morfológicos (ej., diámetro) y fisiológicos (ej., concentración foliar de nutrientes y tipo de planta). Así, se sugieren tres programas de cultivo: uno orientado a plantas propagada por semilla en un cultivo de ciclo corto (una savia, 1+0) para su injerto en campo, otro de planta injertada en vivero (1+1, 1+2) cultivada en envase de gran volumen, y un tercero para la producción de portainjertos clonales.

Tabla 4.3. Plantas tipo algarrobo según diferentes programas de cultivo.

Plantas	Tipo de cultivo (ciclos)	Recomendaciones	Referencia
Plantas de semilla	1+0	Restauración Portainjertos de semillas	Navarro-Cerrillo et al. (2013)
Injerto	1+1	Plantaciones de producción	El Deen et al. (2014)
Planta de micropropagación	1+1	Portainjertos clonales	Romano et al. (2002)

Como para cualquier otro cultivo en vivero, resulta conveniente establecer un programa de cultivo, que recoge el protocolo completo y sistemático de todos los pasos necesarios para obtener un lote de plantas de una determinada calidad (planta tipo). En las Tablas 4.4 y 4.5 (a y b) se ofrecen los protocolos básicos de cultivo del algarrobo para plantas de una savia (1+0) y para plantas injertadas (1+1).

Tabla 4.4. Programa de cultivo para plantas de algarrobo de 1 savia (1+0).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	
Fase de desarrollo	Establecimiento Germinación		Establecimiento Crecimiento inicial		Fase de crecimiento activo			Preacondicionamiento		Plantación				
Zona de cultivo	Cámara de germinación		Invernadero		Exterior									
Tareas necesarias	Tratamiento pregerminativo	Llenado de macetas y siembra	Resiembra		Fertirrigación. Entutorado									
Condiciones ambientales	Temperatura: 10 - 12 °C Humedad: 70 - 90 %		Temperatura: 10 - 20 °C Humedad: 50 - 60 %		Sin control (en función de la meteorología del momento)									
Riego	Pulverización para mantener una humedad ambiental alta		Riegos frecuentes para mantener humedad del sustrato sin lixiviar		Riegos frecuentes (dependiendo del clima) para mantener humedad del sustrato, permitiendo hasta un 10 % de lixiviado			Riegos intensos espaciados (estrés hídrico moderado)						
Tratamientos. Plagas / enfermedades	Desinfección de bandejas y macetas. Aplicación de fungicida de amplio espectro y baja persistencia cada 4 días		Fungicida preventivo cada 10 días (<i>damping-off</i>) en aplicación foliar		Fungicida preventivo cada 15 días en aplicación foliar			Fungicida preventivo cada 45 días en aplicación foliar						
Equipos y suministros	Bandejas de germinación. Macetas (1 litro). Sustrato enriquecido. Fungicidas		Equipo de fertirrigación. Equipo de aplicación de fitosanitarios											
Control cultivo / calidad	Eliminación de semillas con malformaciones y germinaciones inusuales		Recogida de muestras: sustrato y agua	Eliminación de macetas vacías	Tomar datos de cultivo sobre brinzales. Controlar el régimen de cultivo, analíticas de agua y lixivitados				Recogida de muestras: sustrato y agua	Control final de calidad				

Tabla 4.5a. Programa de cultivo para plantas de algarrobo injertadas (1+1): 1^{er} año (antes de injertar).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	
Fase de desarrollo	Establecimiento Germinación		Establecimiento Crecimiento inicial		Fase de crecimiento activo				Fase de bajo crecimiento y preparación para ser injertados			Reacondicionado para injerto		
Zona de cultivo	Cámaras de germinación		Invernadero		Exterior								Invernadero	
Tareas necesarias	Tratamiento pregerminativo	Llenado de macetas y siembra	Resiembra		Fertirrigación. Entutorado								Fertirrigación. Recogida y conservación de púas	
Condiciones ambientales	Temperatura: 10 - 12 °C Humedad: 70 - 90 %		Temperatura: 10 - 20 °C Humedad: 50 - 60 %		Sin control (en función de la meteorología del momento)								Temperatura: 10 - 20 °C Humedad: 50 - 60 %	
Riego	Pulverización para mantener la alta humedad ambiental		Riegos frecuentes para mantener humedad del sustrato sin lixiviar		Riegos frecuentes (dependiendo del clima) para mantener humedad del sustrato permitiendo hasta un 10% de lixiviado		Riegos intensos espaciados (estrés hídrico moderado)			Riegos frecuentes (dependiendo del clima) para mantener humedad del sustrato permitiendo hasta un 10 % de lixiviado				
Tratamientos. Plagas / enfermedades	Desinfección de bandejas y macetas. Aplicación de fungicida de amplio espectro y baja persistencia cada 4 días		Fungicida preventivo cada 10 días (<i>damping-off</i>) en aplicación foliar		Fungicida preventivo cada 15 días en aplicación foliar		Fungicida preventivo cada 45 días en aplicación foliar							
Equipos y suministros	Bandejas de germinación. Macetas de 3 litros. Sustrato enriquecido. Fungicidas		Recogida de muestras: sustrato y agua		Eliminación de macetas vacías		Equipo de fertirrigación. Equipo de aplicación de fitosanitarios			Recogida y conservación de púas. Preparación de material de injerto.				
Control cultivo / calidad	Eliminación de semillas con malformaciones y germinaciones inusuales		Tomar datos de cultivo sobre brinzales. Controlar el régimen de cultivo, analíticas de agua y lixivados		Recogida de muestras: sustrato y agua			Recogida de muestras: sustrato y agua			Control de calidad para injerto			

Tabla 4.5b. Programa de cultivo para plantas de algarrobo injertadas (1+1): 2^{er}. año.

	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene
Fase de desarrollo		Fase de injerto			Fase de crecimiento activo			Preacondicionamiento			Plantación	
Zona de cultivo		Invernadero			Exterior Umbráculo					Exterior		
Tareas necesarias		Fertirrigación Injerto			Fertirrigación			Fertirrigación. Entutorado				
Condiciones ambientales		T: 10-20°C Humedad:50-60 %						Sin control (en función de la meteorología del momento)				
Riego					Riegos frecuentes (dependiendo del clima) para mantener humedad del sustrato permitiendo hasta un 10 % de lixiviado					Riegos intensos espaciados dependiendo de la climatología (estrés hídrico moderado)		
Tratamientos. Plagas / enfermedades		Fungicida preventivo cada 45 días en aplicación foliar										
Equipos y suministros		Equipo de fertirrigación. Equipo de aplicación de fitosanitarios										
Control cultivo / calidad		Control de injertos prendidos		Control de injertos prendidos	Tomar datos de Cultivo sobre brinzales. Controlar el régimen de cultivo, analíticas de agua y lixiviados				Control final de calidad			

4.3.1. Plantas de cultivo corto

Siembra

La siembra suele hacerse directamente en el envase final, una vez aplicado el tratamiento pregerminativo, en siembras de primavera (marzo-abril) en viveros que tengan condiciones invernales suaves, en umbráculos o al exterior, según las condiciones climáticas. Previo al tratamiento pregerminativo, se recomienda eliminar las semillas vanas mediante flotación (agua corriente durante 6 días). Si se efectúa la fase de germinación fuera del alveolo forestal, se puede tratar las semillas recién germinadas con un fungicida antes de su siembra en éste. La siembra se efectúa depositando las semillas en el sustrato a una profundidad de 1 cm. La emergencia tiene lugar a lo largo de la primavera.

Una de las principales limitaciones del cultivo de esta especie es su susceptibilidad a las heladas, que pueden ser letales para las plántulas con tan sólo unos pocos grados bajo cero. La temperatura óptima de germinación es de 10 a 25 °C, con una máxima de 35 °C y una media de 15 °C. Ello obliga a que los viveros ubicados en las zonas más frías deban considerar el uso de invernaderos para la producción de esta especie. Por ejemplo, se han producido plántulas en invernadero a temperatura entre 14 a 17 °C y con fotoperiodo de 12 horas de luz natural, suplementado con 250 w de lámpara halógena (Rhizopoulou y Davies, 1991).

Elección del contenedor

El algarrobo se cultiva principalmente en contenedor, siendo muy poco frecuente el cultivo de planta a raíz desnuda. De hecho, el cultivo a raíz desnuda se suele evitar en esta especie debido a la fragilidad de las raíces laterales, salvo para su uso en jardinería o arboricultura.

El envase determina en gran medida la morfología final de la planta, por lo que debe escogerse teniendo en cuenta otras variables de cultivo que también afectan a ésta (ciclo de cultivo, fertilización, sombreo parcial, manejo del riego, etc.). El cultivo de plantas en contenedor se realiza a una o dos savias, con programas de cultivo muy variables en función de la localización del vivero (Fig. 4.4, Navarro Cerrillo y Pemán, 1998). En el caso de plantas de una savia (plantas 1+0), de uso preferentemente restaurador, se utilizan envases con un volumen entre 200 - 300 cm³, con una sección de alveolo entre 25 y 30 cm² y a densidades de entre 247 y 387 plantas m⁻² (Fig. 4.3). Sin embargo, para el cultivo de plantas de algarrobo de alta calidad funcional, como por ejemplo la requerida para la producción de portainjertos, se ha considerado un estándar alternativo en envases de volumen entre 1.000 y 2.000 cm³ (Navarro Cerrillo y Pemán, 1998); de esta manera, se favorece una buena arquitectura radical.



Figura 4.4. Plantas de algarrobo en alveolo forestal.

Elección del sustrato

Al igual que ocurre con los envases, tampoco puede decirse que exista un medio de cultivo ideal para el cultivo de planta de algarrobo. Los sustratos más utilizados para el cultivo de planta forestal se preparan mediante la mezcla de dos o tres componentes, que son seleccionados de acuerdo con sus características físicas, químicas o biológicas. En algunas ocasiones se incorporan agregados, como los fertilizantes de liberación lenta. Dada la variedad de componentes disponibles, es posible formular los sustratos con las características deseadas según el tipo de contenedor, el riego, la fertilización y el número de savias previsto para la planta al final del cultivo.

Los componentes principales en sustratos de cultivo suelen ser de tipo orgánico, ya que aportan unas condiciones estructurales adecuadas (microporos), aumentan la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico. La cantidad de los componentes orgánicos oscila entre el 25 y el 70 %, siendo los más utilizados la turba tipo *Sphagnum*, la corteza de pino y la fibra de coco (Tabla 4.6). La base de los componentes orgánicos se complementa con componentes inorgánicos, que aportan al sustrato una estructura con macroporos, que mejoran la aireación y el drenaje, así como un carácter estéril al medio de crecimiento. Los sustratos que han presentado mejor resultado en cuanto a la calidad de planta son los formulados con turba rubia, turba de humus, fibra de coco o corteza de pino como componente orgánico principal, y otro componente inorgánico como la vermiculita o la perlita.

Tabla 4.6. Formulaciones de sustrato más recomendables para el cultivo de algarrobo de alta calidad funcional.

Componente	Densidad en seco (g cm ⁻³)	pH inicial - final	Nutrientes minerales	Esterilidad	Conductividad (mS m ⁻¹)
Ciclo corto					
Turba de musgo, perlita y vermiculita (3:1:1)	0,113	5,3 - 6,7		sí	170 - 240
Corteza de pino, turba de musgo y aserrín de pino (3:1:1)		4,8 - 6,3		no	120 - 170
Ciclo largo					
Fibra de coco	0,071	5,5 - 6,25	N-NH ₄ < 5 mg l ⁻¹	sí	206
Fibra de coco, corteza de pino, perlita (6:3:1 vol.)	0,3	6		sí	147

El algarrobo es una especie exigente en cuanto a la formulación del sustrato. Ha de tenerse en cuenta que, en el caso del algarrobo, es importante que la porosidad sea más bien alta para favorecer la fibrosidad del sistema radical (volumen de aire a 10 cm de columna de agua > 10 %; agua fácilmente disponible > 32 %). Normalmente se formulan a partir de componentes orgánicos tipo turba rubia, turba de humus, o fibra de coco (más del 75 % en volumen), y algún componente inorgánico tipo perlita, vermiculita o arena de río (menos del 25 % en volumen). Las plántulas suelen presentar sistemas radicales poco ramificados y débiles, con escasas raíces laterales de menos de 1 cm de longitud (Rhizopoulou y Davies, 1991). Por ello, son frecuentes las mezclas que incluyen algún componente de baja porosidad, tipo arcilla o limonitas (menos del 10 %), que parecen ser los más adecuados, al obtenerse una planta con un mayor crecimiento y más equilibrada. En el caso de cultivos de larga duración (planta 2+0 o 1+1) se recomiendan los sustratos que utilizan como componente principal la fibra de coco por su mayor estabilidad a largo plazo; sus características de fertilidad permiten que los nutrientes

se liberen gradualmente a medida que la fibra se descompone, además de poseer propiedades antifúngicas que promueven el control de la proliferación de patógenos y enfermedades en el vivero.

El hecho de que la fertilización en vivero suele ser deficiente, ha llevado, en algunos casos, a incorporar como componente el suelo natural, con el fin de propiciar un mejor desarrollo radical de la especie, cosa que es innecesaria si se cuida la fertilización nitrogenada y fosfórica. Aunque, como se ha indicado, no se recomienda el cultivo en eras a raíz desnuda, en caso de usarse esta técnica de cultivo, se debe evitar los sustratos muy pesados, realizando enmiendas si fuera preciso, ya que limitan el crecimiento de las plantas.

Fertilización

El algarrobo es una especie de crecimiento relativamente rápido en su estado juvenil, por lo que es necesaria una fertilización adecuada cuando se cultiva en vivero. Se trata de una especie que responde muy bien a la fertilización y, aunque no existe un programa de fertilización específico, sí se han estudiado diferentes formulaciones y dosis para su cultivo, utilizándose con frecuencia los de liberación lenta o controlada. El viverista, no obstante, tiene que ir adecuando el programa de fertilización a sus particulares condiciones de producción y a la evolución del cultivo (tipo de sustrato, calidad del agua de riego, duración del cultivo y planta tipo, principalmente).

Se ha comprobado que la aplicación de fertilizantes en dosis medias o bajas no es adecuada para un buen desarrollo de la planta (Del Campo 2002; Correia *et al.*, 2003). Igualmente, estos trabajos han puesto de manifiesto la drástica paralización del crecimiento tan pronto se agotan las reservas del fertilizante de liberación lenta. Por ello, se recomienda el uso de fertirrigación, en combinación o no fertilizantes de liberación lenta, tan pronto como se espere el agotamiento del sustrato.

Algunas dosis recomendables en fertilizantes de liberación lenta controlada son 16-8-9 en dosis de 3,5 g l⁻¹ o 9-13-18 en dosis de 5 g l⁻¹ de sustrato. También se pueden establecer programas de fertirrigación (Navarro Cerrillo *et al.*, 1998), recomendándose una fertilización inicial de base N-P-K (12-6-6) que favorezca el crecimiento de la raíz, seguido de fertilizaciones ricas en N y P durante la fase de crecimiento (20-15-5 con un quelato Fe-6 %) y una fertilización de finalización de 10-7-9. Este programa de fertilización produce, para un cultivo en contenedor de más de 250 cm³, plantas con altura final de 9,36 cm y 3,38 mm de diámetro en el cuello de la raíz, con una biomasa seca total de 2,62 g y una concentración de N en hoja de 12,8 mg g⁻¹. Planelles *et al.* (2001) han mostrado que con dosis de 150 mg l⁻¹ de N, el valor de distintas variables de la especie, entre las que se incluyen pesos secos aéreos, radicales y totales, aumenta significativamente con el incremento de la dosis de fósforo de 10 a 70 mg l⁻¹. Así, con este programa de fertilización aplicado a un cultivo en ForestPot 300 cm³, se han obtenido plantas con una altura final de 16,9 cm, un diámetro de 2,98 mm, una biomasa seca total de 4,28 g y una concentración de N en hojas de unos 6 mg g⁻¹. Los datos procedentes de varios viveros de Andalucía recomiendan concentraciones de nutrientes en hoja próximos a los siguientes valores: [N]: 24 mg g⁻¹, [P]: 1,4 mg g⁻¹ y [K]: 13 mg g⁻¹.

Por otra parte, es importante mantener unos aportes adecuados de micronutrientes, especialmente de hierro en formas disponibles para la planta, especialmente si el agua de riego es alcalina y conlleva un aumento del pH del sustrato. Por último, hay

que indicar que se han descrito las deficiencias de nutrientes en hojas (Correia *et al.*, 2003; Navarro-Cerrillo *et al.*, 2003).



Figura 4.5. Plantones de algarrobo de una savia en fase de endurecimiento.

Micorrización

El uso de micorrizas para el cultivo de algarrobo no ha sido muy estudiado, aunque se conoce el efecto beneficioso de los hongos simbioses sobre el establecimiento de brinzales de la especie (Correia y Martins-Louçao, 1996). Así, existen varios trabajos relacionados con la micorrización de algarrobo en vivero (Correia y Martins-Louçao, 1996; Aponte *et al.*, 2010; Talbi *et al.*, 2016; Zouari y El Mtili, 2020; Outamamat *et al.*, 2022).

Se sabe que el crecimiento del algarrobo depende, en gran medida, de la eficiencia de las interacciones con los hongos micorrízicos del suelo (Ouahmane *et al.*, 2012, Jadrane *et al.*, 2021), en particular de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF). En el cultivo de plantas en vivero se ha reconocido que la simbiosis micorrícica es un factor clave para facilitar el establecimiento de plantas en suelos degradados mediante el uso de hongos micorrízicos arbusculares nativos en prácticas de micorrización controlada (Ouahmane *et al.* 2007). Así, se ha ensayado la inoculación *in vitro* de hongos ectomicorrízicos (ECM; *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker y Couch) para mejorar el crecimiento y la formación de raíces en plántulas de algarrobo (Zouari y El Mtili, 2020).

A pesar de los inconvenientes de incorporar de forma operativa la inoculación en vivero, es posible utilizar técnicas sencillas (Zegaye *et al.*, 2012). Para obtener plantas micorrizadas, es necesario llevar a cabo un control riguroso durante el proceso de inoculación para garantizar la identidad del material fúngico utilizado y verificar la madurez y calidad de los carpóforos. El material fúngico puede utilizarse fresco o secarse en láminas a aproximadamente 40 °C durante 2 o 3 días y almacenarse en frío hasta su uso. En este caso, es necesario rehidratarlo antes de la inoculación. Existen varios métodos de inoculación disponibles, pero el más recomendado es la inyección. Este método implica preparar una suspensión acuosa mediante el suave batido de los carpóforos y luego incorporarla con una jeringa en uno o varios pisos del cepellón de cada planta después de su trasplante. Por lo general, se aconseja utilizar una dosis mínima de 1 gramo de trufa fresca por planta. Es importante cuidar el procedimiento de micorrización, ya que, como se ha indicado, la simbiosis micorrícica entre las raíces de las plantas y los hongos beneficiosos resulta fundamental para el crecimiento saludable y la absorción de nutrientes.

Otras prácticas culturales

La programación de riego es un aspecto clave de la gestión del cultivo de cualquier especie de vivero, pero dadas las particularidades de cada programación en cada vivero, no es posible hacer recomendaciones específicas para cada una de ellas. No obstante, El riego de endurecimiento en algarrobo debería ser objeto de investigaciones más profundas, pero, en principio, puede recomendarse su práctica con el de lograr menores potenciales hídricos al alba (-0,75 MPa).

Una práctica relativamente común para el caso del algarrobo, con el fin de controlar el desarrollo en altura, es la poda aérea al final del cultivo. Esta práctica homogeniza la altura media del lote, aunque también tiene efectos sobre el diámetro y los pesos secos, la esbeltez y la relación parte aérea - parte radical. La respuesta de las plantas a esta práctica es variable según su estado de desarrollo (fase de cultivo) y de la cantidad de tallo eliminado, debiendo evitarse las podas tardías y muy intensas. Aunque algunos autores no la recomiendan como práctica rutinaria (Winer, 1980), en determinadas calidades de planta (ej., portainjertos) puede mejorar su calidad funcional.

Atributos de calidad de las plantas en cultivos de ciclo corto

Existen trabajos en donde se han definido valores orientativos para los atributos morfológicos, fisiológicos y de respuesta de brinzales de algarrobo de una savia (Navarro-Cerrillo *et al.*, 1998 y 2006, del Campo, 2002). En general, se considera que es una especie de crecimiento rápido en vivero, por lo que, para trabajos de repoblación, debe favorecerse el máximo crecimiento que proporcione plantas de buen valor comercial y evitar las plantas de pequeño tamaño con una altura inferior a 15 cm. La distribución de la biomasa entre la parte aérea y la raíz es equilibrada, con valores de relación parte aérea-parte radical superiores a 1,5 (Navarro Cerrillo *et al.*, 1998).

En los distintos ensayos realizados (Planelles *et al.*, 2001; Navarro Cerrillo *et al.*, 2001; Del Campo, 2002) no se pone de manifiesto una relación clara entre los atributos de las plantas en vivero y la respuesta en campo en esta especie. No obstante, de estos trabajos parece desprenderse la mayor importancia de los índices morfológicos (relación peso seco aéreo - peso seco radical, índice de Dickson-QI), que se explicaría por el hecho de que el algarrobo apenas reduce su conductancia estomática ante situaciones de estrés hídrico (Lo Gullo y Salleo, 1988; Correia y Martins-Loução, 1990, 1995; Correia *et al.*, 2001). Igualmente, se ha comprobado la influencia importante del estado nutritivo, sobre todo del fósforo, dada la necesidad de un adecuado desarrollo radical de la especie, lo que se verá favorecido por un apropiado nivel de reservas nutricionales para translocar hacia las zonas con mayor demanda (Correia y Martins-Loução, 1997 y 2004; Correia *et al.*, 1999 y 2002).

4.3.2 Cultivo de plantas injertadas

El uso de la propagación vegetativa está más que justificado en el algarrobo porque esta vía permite mantener en las plantas que se van a establecer en campo las características genéticas de la planta madre; planta madre que se ha seleccionado por presentar rasgos de interés productivo. Esta opción de multiplicación también permite mantener en las plantas las tolerancias, adaptaciones o resistencias a agentes bióticos o determinadas condiciones abióticas de la planta madre. Además, cuando se busca la producción de frutos, como en los cultivos de algarrobo, la multiplicación

vegetativa permite reducir la fase juvenil, lo que representa una clara ventaja económica frente a la multiplicación sexual. Así, la multiplicación vegetativa, en concreto el injerto, es una técnica de propagación muy utilizada en fruticultura, si bien su éxito depende de múltiples factores, como la especie, la compatibilidad entre tejidos, las condiciones ambientales (p. ej., temperatura y humedad) y la técnica utilizada para la ejecución del injertado, así como el estado vegetativo del patrón (Hartmann *et al.*, 2014).

El algarrobo presenta dificultades para enraizar mediante estaquillado de partes de plantas (Hartmann *et al.*, 2014; El Kahkahi *et al.*, 2016), por lo que el injerto ha sido el procedimiento convencional para su multiplicación vegetativa. El injerto de yemas de árboles femeninos seleccionados por su alta producción sobre plantas portainjerto de tamaño adecuado ha sido y es una práctica habitual (Batlle y Tous, 1997). Como se ha indicado anteriormente, en los últimos años ha aumentado la demanda de plantas de gran tamaño producidas en envases de gran volumen en trabajos de implantación de algarrobo injertado con objetivo productor, por lo que se considera necesario incluir en este capítulo información específica al respecto.

Contenedores y sustratos

Los envases más frecuentes en cultivo de plantas de varias savias para esta especie son macetas forestales de volumen comprendido entre 1.000 y 2.000 cm³ (Fig. 4.6). El uso de envases de gran volumen debe hacerse con las precauciones necesarias para evitar los daños a la raíz, así como adecuarlo al resto de las variables de cultivo que también afectan a ésta (ciclo de cultivo, fertilización, sombreo parcial, manejo del riego, etc.). Los efectos de los contenedores de gran volumen sobre la calidad de planta de algarrobo no han sido estudiados, por lo que debe tenerse en cuenta los posibles problemas de espiralización u otros daños morfológicos en el sistema radical, tales como necrosis o pérdida de los meristemos terminales.



Figura 4.6. Plantones de algarrobo en envase de 2 litros preparados para su uso como portainjertos.

La formulación de los sustratos en el caso de cultivos de larga duración debe ser diferente a la que se utiliza para un cultivo convencional. En este caso es importante la estabilidad del sustrato a largo plazo, así como las características fisicoquímicas para favorecer la fibrosidad del sistema radical. Los sustratos que han presentado mejor resultado en cuanto a la calidad de planta son los constituidos por fibra de coco (fibra de coco-vermiculita [2:1 v/v] bajo sombra (65 % de porosidad)). Debe evitarse en este caso el uso de turbas, por su baja durabilidad en cultivos de larga duración, o corteza de pino como componente orgánico principal, así como la perlita como componente inorgánico. En este tipo de producción, puede utilizarse materiales hidroabsorbentes en el sustrato de cultivo para reducir el estrés hídrico postrasplante.

Es importante cuidar que el pH final de la mezcla sea ligeramente ácido, dadas las exigencias de la especie. Valores de pH alcalinos pueden dar lugar a problemas de disponibilidad de nutrientes, como el hierro o el fósforo. En este tipo de cultivos, se requiere un seguimiento constante de la planta en lo que respecta a su fertilización. Al inicio del cultivo, se puede combinar una fertilización convencional con fertilizantes de liberación lenta y, a medida que el cultivo se va prolongando, con fertirrigación o fertilizantes foliares. El control de la arquitectura de las plantas es fundamental, por lo que se utilizan soportes especiales y tutorados para darles la forma adecuada.

La calidad final de las plantas es muy distinta al cultivo estándar de algarrobo en envase de pequeño volumen y con una duración de una o dos savias. En este caso se trata de favorecer el crecimiento en altura de las plantas, manteniendo un cepellón de un volumen limitado y un diámetro en la base suficiente para proporcionar plantas compactas de buen valor comercial (Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Relación entre el envase de cultivo y las dimensiones finales de la planta de algarrobo (fuente: datos propios).

Volumen del envase (litros)	Altura de las plantas (cm)	Calibre de las plantas (cm)
0,35	16 - 20	0,4-0,5
2	30 - 55	0,8-1,2
3	74 - 92	1,2-1,6

Injertado

Los portainjertos más frecuentes suelen ser plantas de 1 o 2 savias con el tamaño suficiente como para favorecer su manipulación. Las plantas destinadas a ser injertadas pueden producirse inicialmente en envases propios de un cultivo de ciclo corto, que se transplantan posteriormente a envases de mayor tamaño, o bien producirlas desde el inicio en estos últimos.

Las púas se preparan a partir de ramillos de un año (15 - 20 cm) con 2 - 4 hojas y se deben mantener en un lugar climatizado para el proceso de injertado, ya que no deben perder humedad antes de su injertado. El tamaño de las púas y de los portainjertos debe ser de aproximadamente del grosor de un lápiz.

Se deben recolectar brotes frondosos y sanos de los algarrobos seleccionados como plantas madre. Debe tenerse en cuenta que en cultivo debe mantenerse una proporción de hembras y machos suficiente para cubrir la polinización de las flores o bien usar variedades hermafroditas, seleccionando éstas según diferentes criterios de rendimiento de semilla/vaina, azúcares totales, fenoles totales y porcentajes de fibra (Omran *et al.*, 2018) (ver Capítulo 3). Además, la elección de los genotipos macho o hermafrodita como polinizadores debe tener en cuenta su fenología de floración, que debe coincidir las variedades hembra que se produzcan.

Se han utilizado diferentes técnicas para el injertado del algarrobo (Tabla 4.8). La principal técnica de injertado en vivero es la que usa yemas axilares (de escudete o de yema en chip) y la técnica de injertado en hendidura (Fig. 4.7), por su rapidez de ejecución. Sin embargo, en campo se prefiere el injerto de parche y el de cuña o corona (Fig. 4.8). Asimismo, el algarrobo admite sin dificultad tanto injertos de primavera como de otoño.

Tabla 4.8. Tipos de injerto realizados en algarrobo.

Tipo de injerto	Tipo de púa	Época	Referencia
Hendidura	Yemas axilares	Primavera	Omran y Hassan, 2019
Silla	Yemas apicales y axilares	Primavera	
Corona	Yemas apicales y axilares	Primavera	
Chip	Yemas axilares	Primavera-Otoño	Collado, 2001
Escudete	Yemas axilares	Primavera-Otoño	
Púa	Yemas apicales y axilares	Primavera-Otoño	
Canutillo	Yemas axilares	Otoño	Tous, 1984
Parche	Yemas axilares	Primavera-Otoño	Collado, 2001

Los portainjertos se preparan según el injerto a realizar, pudiendo necesitar un deshojado más o menos intenso que facilite su manipulación. El injerto se suele hacer a diferentes alturas, pero a menos de 30 cm del cuello de la raíz, o un poco por debajo de la cruz, utilizando un cuchillo afilado para hacer los cortes y cintas de injerto para mantener la unión apretada y evitar su desecación (Fig. 4.7). Durante la primera etapa del injerto es muy importante lograr un contacto estrecho entre los tejidos del cambium del portainjerto y de la púa para favorecer la aparición del callo (Hartmann *et al.* 2014). Las plantas injertadas se deben colocar bajo túneles de polietileno bajo sombra (porosidad del 65 %) durante dos meses. Esta práctica permite mantener las plantas injertadas en condiciones de alta humedad para evitar la deshidratación del vástago. Los ambientes secos, por debajo del punto de saturación, inhiben la formación de callos y desecan los tejidos, comprometiendo el desarrollo de los injertos. Todos los brotes que surgen del patrón por debajo de la posición de injerto se deben eliminar a medida que van apareciendo.



Figura 4.7. Injertos de yema en chip y de hendidura en portainjertos de 1 savia.



Figura 4.8. Injerto de corona; muy utilizado para el cambio varietal en plantaciones ya desarrolladas.



Figura 4.9. Planta injertada mediante injerto de hendidura, a los 3 meses.

4.3.3 Otros métodos de propagación

Como ya se ha indicado, el algarrobo no se multiplica fácilmente por estaquillado de partes de plantas. Existe alguna referencia al uso del acodo aéreo en esta especie (Tous, 1984; Guillén *et al.*, 2018). Este método se lleva a cabo provocando heridas o realizando un anillado de unos 2 cm en la región de la rama a acodar. La rama elegida debe tener, al menos, 2 años, y debe estar sana y con buena exposición a la luz. La herida se cubre con un envoltorio de sustrato sujeto con una lámina plástica y cubierto con papel de aluminio, lo que evita su exposición a la luz. Las raíces iniciales se desarrollan después de tres meses de tratamiento y la rama con sus raíces se puede cortar del progenitor y establecer en una maceta para su posterior plantación. Los brotes enraizados se adaptan fácilmente a los envases de cultivo (Fig. 4.10).



Figura 4.10. Procedimiento de acodo aéreo en algarrobo.

En fase experimental se han aplicado otros métodos de micropropagación *in vitro*, como el microinjertado (Hsina y El Mtili, 2009) y la propagación de tejidos a partir de yemas axilares cultivadas en un medio rico en nutrientes (Romano *et al.*, 2002; Custódio *et al.*, 2004). Este último método podría ser interesante en un futuro para la producción clonal de individuos seleccionados por sus buenas cualidades como portainjertos. Estas técnicas requieren instalaciones que permitan el control riguroso de las condiciones ambientales y de asepsia, lo que significa que su uso no sea accesible para muchos viveros.

4.3.4 Control fitosanitario en viveros de algarrobo

La calidad de las plantas producidas en un vivero está determinada, no solo por sus atributos morfofisiológicos y genéticos, sino también por su estado fitosanitario, ya que éste condiciona en gran medida el éxito de la plantación, tanto en lo referido a su supervivencia como a su desarrollo. Además, debe tenerse en cuenta que los viveros,

si no son gestionados adecuadamente al respecto, pueden ser foco de difusión de plagas y enfermedades. De hecho, las condiciones de cultivo de las plantas en los viveros son especialmente favorables para su aparición debido a las condiciones de temperatura y humedad, la cantidad y alta densidad de plantas coetáneas de una misma especie, a veces con escasa diversidad genética, un crecimiento rápido de las plantas que da lugar a tejidos poco lignificados y, por tanto, altamente susceptibles, el uso de sustratos artificiales favorables al establecimiento de patógenos de suelo (a su vez, también portadores de plagas y enfermedades si no son de buena calidad), y la dificultad de un control biológico adecuado (Navarro-Cerrillo y Pemán, 1998).

El algarrobo es susceptible, tanto en fase juvenil como adulta, a diferentes agentes bióticos (Trapero Casas *et al.*, 2022). En viveros es muy frecuente *Pseudocercospora ceratoniae*, patógeno específico de la especie que causa necrosis en las hojas y defoliaciones generalizadas, dando lugar a un retraso en el crecimiento y al debilitamiento de las plántulas que las más susceptibles a otras enfermedades más graves (Trapero *et al.* 2003). Cabe señalar, también, la acción de otras enfermedades fúngicas, favorecidas por condiciones de encharcamiento, deficiente elección o gestión de y falta de medidas preventivas. Así, Varo y Trapero (2001) han determinado la presencia de agentes asociados a *damping-off*, que afectan a las raíces, como *Fusarium oxysporum* y *Pythium irregulare* y otros que causan necrosis foliares, como *Colletotrichum acutatum*, *Hainesia* sp., *Phomopsis archeri* y *Pestalotiopsis* sp.

Las medidas generales para el control de estos patógenos incluyen: utilizar sustratos de calidad libres de patógenos, mantener un buen drenaje, evitar una baja aireación en los cultivos y efectuar controles diarios para la rápida detección de enfermedades y, en su caso, efectuar tratamientos con fungicidas. Se debe mantener las herramientas limpias y, al final del cultivo, efectuar una desinfección de contenedores e invernaderos con, por ejemplo, una solución de lejía diluida.

4.3.5 Calidad final de lotes para su comercialización

Los requisitos de calidad externa de lotes de plantas forestales de amplio uso, como los pinos y las quercíneas, están establecidas en el Real Decreto 289/2003. Así, los lotes o partidas de las especies reguladas deben estar conformados por, al menos, un 95 % de plantas de calidad cabal y comercial, definida ésta en base a criterios de morfológicos y de estado fitosanitario y, para algunas especies reguladas, también a criterios de dimensiones y edad. Los defectos no admisibles según esta norma son:

- Heridas distintas de las causadas por poda
- Heridas debidas a daños de arranque
- Ausencia de yemas susceptibles de producir brote apical
- Tallos múltiples
- Sistema radical deformado
- Signos de desecación, recalentamiento, enmohecimiento o podredumbre
- Daños causados por organismos nocivos
- Desequilibrio entre la parte aérea y la parte radical

Si bien el algarrobo no es una especie contemplada en esta normativa, resulta conveniente aplicar los criterios morfológicos y de estado fitosanitario y establecer los que correspondan a la especie y objetivo en lo relativo a su tamaño. La experiencia en campo muestra que las plantas más grandes de algarrobo tienden a tener mejor supervivencia y crecimiento en campo. No obstante, la preparación del suelo o la fecha de plantación tienen mayor peso en el éxito de las repoblaciones de alcornoque

que la calidad de la planta. La calidad de la planta parece ser importante cuando se asocia con plantaciones tempranas o intermedias en el tiempo y buenas preparaciones del suelo (Palacios *et al.*, 2009).

Independientemente de estos criterios, existen trabajos en donde se han definido valores orientativos para los atributos morfológicos y fisiológicos de plantas de algarrobo de dos calidades funcionales (1+0, 1+1, Tabla 4.9). En general, se considera que es una especie de crecimiento rápido en vivero, por lo que debe procurarse favorecer un crecimiento equilibrado que proporcionen plantas compactas de buen valor comercial (Fig. 4.11) y evitar plantas de tamaño inadecuado para los trabajos de repoblación (ej., relaciones inadecuadas altura/diámetro – esbeltez -) (Fig. 4.12). No obstante, en esta especie debe tenerse en cuenta que la relación de biomasa entre la parte aérea y la raíz, con valores superiores a 5, no es muy equilibrada.

Tabla 4.9. Atributos morfológicos y fisiológicos de planta de algarrobo de dos calidades funcionales (1+0 y 1+1) (fuente: datos propios).

Atributo	Valores medios de referencia 1+0	Valores recomendados 1+0	Valores medios de referencia 1+1
Atributos morfológicos			
Altura (cm)	35,1 ± 17,9	25 - 35	161 ± 10,6
Diámetro del cuello de la raíz (mm)	3,91 ± 0,95	2,5 - 4	6,01 ± 0,87
Peso aéreo (g)	3,74 ± 2,08	3 - 4	29,47 ± 6,11
Peso raíz (g)	7,11 ± 2,60	7 - 8	8,27 ± 1,50
Peso total (g)	10,85	10 - 12	35,74 ± 4,06
Peso aéreo: Peso radical	0,52 ± 0,18	0,8 - 1	3,56 ± 0,29
Esbeltez	9,16±4,41	8 - 10	26,31 ± 3,91
Atributos fisiológicos			
[N] foliar (mg g ⁻¹)	12,4 ± 0,6	12 - 14	20,6 ± 0,33
[P] foliar (mg g ⁻¹)	1,2 ± 0,4	1 - 2	0,33 ± 0,01
[K] foliar (mg g ⁻¹)	4,3 ± 0,4	4 - 5	1,77 ± 0,18
[Ca] foliar (mg g ⁻¹)	10,1 ± 1,6	9 - 11	5,56 ± 1,01
[Mg] foliar (mg g ⁻¹)	4,7 ± 1,3	4 - 5	0,61 ± 0,23



Figura 4.11. Ejemplos de plantas de algarrobo de calidad final. Reunión EIG Almería.



Figura 4.12. Ejemplo de plantas rechazables por su escaso desarrollo.

Bibliografía

- Aponte C., García, L., Marañón, T., Gardes M. (2010). Indirect host effect on ectomycorrhizal fungi: Leaf fall and litter quality explain changes in fungal communities on the roots of co-occurring Mediterranean oaks. *Soil Biol. Biochem.*, 42(5), 788–796.
- Battle I., Tous J. (1997). Carob tree. *Ceratonia siliqua* L. Promoting the conservation and use of under-utilised and neglected crops. 17. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy.
- Collado Alamar, J., (2001). El injerto de cítricos en campo. *Comunitat Valenciana Agraria* (España).
- Correia, M., Coelho, D., David, M., (2001). Response to seasonal drought in three cultivars of *Ceratonia siliqua*: leaf growth and water relations. *Tree Physiol.*, 21, 645–653.
- Correia, P., Anastácio, I., Candeias, M., Martins-Loução, M., (2002). Nutritional diagnosis in carob-tree (*Ceratonia siliqua* L.): relationships between yield and leaf mineral concentration. *Crop Sci.*, 42, 1577–1583.
- Correia, P., Anastácio I., Martins-Loução, M., (1999). The effect of NK fertilization on growth patterns and leaf nutrient concentration of carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). En: *Improved crop quality by nutrient management* (Anaç, D., Martin-Prével P., eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 31–34.
- Correia, P. J., Guerreiro, J. F., Pestana, M., Martins-Loução, M. A. (2017). Management of carob tree orchards in Mediterranean ecosystems: Strategies for a carbon economy implementation. *Agrofor. Syst.*, 91(2), 295–306.
- Correia, P., Pestana, M., Martins-Loução, M., (2003). Nutrient deficiencies in carob (*Ceratonia siliqua* L.) grown in solution culture. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 78, 847–852.
- Correia, P., Martins-Loução, M., (1990). Effect of different water quantities on the vegetative growth of young carob-trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Actas Hortic.*, 6, 412–417.
- Correia, P., Martins-Loução, M., (1995). Seasonal variations of leaf water potential and growth in fertigated carob-trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Plant Soil*, 172, 199–206.
- Correia, P., Martins-Loução, M., (1996). Preliminary studies on mycorrhizas of *Ceratonia siliqua* L. En: *Mycorrhizas in integrated systems from genes to plant development* (Azcón-Aguilar C., Barea J., eds.). EUR 16728 EN DG XII. ECSC-EC-EAEC, Brussels. pp. 86–88.
- Correia, P., Martins-Loução, M., (1997). Leaf nutrient variation in mature carob (*Ceratonia siliqua*) trees in response to irrigation and fertilization. *Tree Physiol.*, 17, 813–819.
- Correia, P., Martins-Loução, M., (2004). Effect of nitrogen and potassium fertilization on vegetative growth and flowering of mature carob trees (*Ceratonia siliqua*): variations in leaf area index and water use indices. *Aust. J. Exp. Agric.*, 43, 83–89.
- Correia, P. J., Pestana, M. (2018). Exploratory analysis of the productivity of carob tree (*Ceratonia siliqua*) orchards conducted under dry-farming conditions. *Sustainability*, 10(7), 2250.
- Custódio, I., Martins-Loução, M., Romano, A., (2004). Influence of sugars on in vitro rooting and acclimatization of carob tree. *Biol. Plant.*, 48(3), 469–472.
- del Campo, A., (2002). Régimen de cultivo, desarrollo en vivero, calidad de planta y respuesta al establecimiento en cuatro especies de frondosas mediterráneas. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, Córdoba.
- El Deen, E.M.Z., El-Sayed, O.M., El-Rahman, A., El-Sayed, I., Hegazi, G.A. (2014). Studies on carob (*Ceratonia siliqua* L.) propagation. *IOSR JAVS*, 7(5), 31–40.
- El Kahkahi, R., Moustaine, M., Mouhajir, A., Bachir, S., Lemrhari, A., Zouhair, R., Errakhi, R., (2016). Technical sheet on the culture carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. Texto sin referencia.

- Frutos D., 1988. Efecto de los ácidos sulfúrico y giberélico (GA3) en la germinación del algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.). En: Proceedings of the II International Carob Symposium. (Fito P., Mulet A., eds.). Valencia, Spain. pp. 265-280
- Gharnit, N., El Mtili, N., Ennabili, A., Sayah, F. (2006). Importance socio-économique du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) dans la province de Chefchaouen (Nord-ouest du Maroc). *J Bot. (Morot)*, 33(1), 43-48.
- Guillén, A., Gallego, P., García, V., Peris, J., (2018). El Algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.), importancia paisajística, económica y perspectivas de futuro. *Chron. Nat.*, (7), 45-54.
- Gunes, E., Gubbuk, H., Ayala-Silva, T., Gozlekci, S., Ercisli, S. (2013). Effects of various treatments on seed germination and growth of carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Pak. J. Bot.*, 45(4), 1173-1177.
- Hartmann, H., Kester, D., Davies, F., Geneve, R., (2014). *Plant Propagation: Principles and Practices**, 8th ed. Harlow, United Kingdom: Pearson. 922 p.
- Hsina, T., El Mtili, N., (2009). In vitro micrografting of mature carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Hortic. J.*, 2, 44-48.
- ISTA (International Seed Testing Association) (2002). *International Rules for Seed Testing*, edition 2002-2018. ISTA Basserdorf, CH. International Seed www.seedtest.org
- Jadrane, I., Dounas, H., Kouisni, I., Aziz, F., Ouahmane, I. (2021). Inoculation with selected indigenous mycorrhizal complex improves *Ceratonia siliqua*'s growth and response to drought stress. *Saudi J. Biol. Sci.*, 28(1), 825-832.
- Lo Gullo, M., Salleo, S., (1988). Different strategies of drought resistance in three Mediterranean sclerophyllous trees growing in the same environmental conditions. *New Phytol.*, 108, 267-276.
- Navarro Cerrillo, R.M., Pemán, J., (1998). *Apuntes de Producción de Planta Forestal*. Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Navarro Cerrillo, R.M., Arroyo, M., Gallegos, V., Alcántara, E., (2003). Deficiencias minerales en plantas de una savia de dos especies de frondosas mediterráneas (*Quercus suber* L.; *Ceratonia siliqua* L.). *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.*, 12(1), 61-73.
- Navarro Cerrillo, R.M., del Campo, A., Alejano, R., Álvarez, I. (1998). Caracterización de calidad final de planta de encina (*Quercus ilex* L.), algarrobo (*Quercus suber* L.), algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.) y acebuche (*Olea europaea* L. var. *sylvestris*) en cinco viveros en Andalucía. *Informaciones Técnicas*, 49/98. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca, Sevilla.
- Navarro Cerrillo, R.M., del Campo, A., Ceacero C. (2001). Caracterización del cultivo y determinación de calidad de planta de *Ceratonia siliqua* L. y *Olea europaea* L. var. *sylvestris* Brot. en varios viveros forestales. En: *Actas del III Congreso Forestal Español* (Junta de Andalucía, ed.). Granada. Mesa 3. pp. 861-868.
- Navarro Cerrillo, R.M., Villar, P., del Campo, A., (2006). Morfología y establecimiento de los plantones. En: *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos*. Estado actual de conocimientos (Cortina, J., Peñuelas, J., Puértolas, J., Savé, R., Vilagrosa, A., eds.). Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. pp. 67-88.
- Navarro Cerrillo, R.M., Sánchez Lancha, A., Arroyo Sauces, M., Plaza, I., Mallofret E., Lara, M., (2013). *Ceratonia siliqua*. En: Pemán, J., Navarro Cerrillo, R.M., Nicolás, J.L., Prada, M., Serrada, R., *Producción y manejo de semillas y plantas forestales* (tomo II). Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Navarro-Cerrillo R.M., Gálvez C., (2001). *Manual para la identificación y reproducción de semillas de especies vegetales autóctonas de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Córdoba. Tomo I. pp. 106-108.
- Omran, M., Hassan, A., Mohamed, H., (2018). Morphological, physiological and biochemical genetic identification of three female Egyptian carob (*Ceratonia siliqua* L.) strains. *Bull. Fac. Agric. Cairo Univ.*, 69, 387-401.

- Omran, M., Hassan, A., (2019). Effect of some factors affecting selected carob strain (*Ceratonia siliqua* L.) propagation by grafting. *J. Plant Prod.*, 10(11), 903–910.
- Ouahmane, L., Ndoeye, I., Morino, A., Ferradous, A., Sfairi, Y., Abourouh, M., (2012). Inoculation of *Ceratonia siliqua* L. with native arbuscular mycorrhizal fungi mixture improves seedling establishment under greenhouse conditions. *Afr. J. Biotechnol.*, 11(98), 16422–16426.
- Ouahmane, L., Thioulouse, J., Hafi, D., Prin, Y., Ducouso, M., Galiana, A., Plenchette, C., Kisa, M., Duponnois, R., (2007). Soil functional diversity and P solubilization from rock phosphate after inoculation with native or allochthonous arbuscular mycorrhizal fungi. *Forest Ecol. Manag.*, 241, 200–208.
- Outamamat, E., Dounas, H., Aziz, F., Arguaz, A., Duponnois, R., Ouahmane, L., (2022). The first use of morphologically isolated arbuscular mycorrhizal fungi single-species from Moroccan ecosystems to improve growth, nutrients uptake and photosynthesis in *Ceratonia siliqua* seedlings under nursery conditions. *Saudi J. Biol. Sci.*, 29(4), 2121–2130.
- Palacios, G., Navarro Cerrillo, R.M., del Campo, A., Toral, M., (2009). Site preparation, stock quality and planting date effect on early establishment of Holm oak (*Quercus ilex* L.) seedlings. *Ecol. Engin.*, 35(1), 38–46.
- Pérez-García, F.J. (2009). Germination characteristics and intrapopulation variation in carob (*Ceratonia siliqua* L.) seeds. *Span. J. Agric. Res.*, (2), 398–406.
- Piotto, B., Piccini, C., (1996). Storage of scarified carob seeds: influence of container, temperature and duration on seed quality. *Fruits* 51, 261–267.
- Planelles, R., Oliet, J., Artero, F., López, M., (2001). Efecto de distintas dosis N-P-K sobre la calidad funcional de planta de *Ceratonia siliqua*. Respuesta en plantación. En: *Actas del III Congreso Forestal Español* (junta de Andalucía, ed.). Granada. Mesa 3. pp. 599–605.
- Rhizopoulou, S., Davies, W., (1991). Influence of soil drying on root development, water relations and leaf growth of *Ceratonia siliqua* L. *Oecologia*, 88, 41–47.
- Romano, A., Barros, S., Martins-Loução, M., (2002). Micropropagation of the Mediterranean tree *Ceratonia siliqua*. *PCTOC*, 68, 35–41.
- Talbi, Z., Chliyah, M., Mouria, B., El Asri, A., Ait Aguil, F., Ouazzani Touhami, A., Douira, A., (2016). Effect of double inoculation with endomycorrhizae and *Trichoderma harzianum* on the growth of carob plants. *IJAPBC*, 5(1), 44–58.
- Tous, J., (1984). Cultivo del algarrobo. Hojas Divulgadoras, (10). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Trapero Casas, A., Varo, R., Sánchez, M.E., Roca, L. F., Moral, A.L., Brisach, C.A. (2022). Enfermedades del algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.). *Rev. Frut.*, (87), 6–31.
- Trapero, A., Romero, M. A., Varo, R., Sánchez, M. E. (2003). First report of *Pestalotiopsis maculans* causing necrotic leaf spots in nursery plants of *Arbutus unedo* and *Ceratonia siliqua* in Spain. *Plant Dis.*, 87(10), 1263–1263.
- Varo, R., Trapero, A., (2001). Las enfermedades del algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.) en Andalucía. En: *Actas del III Congreso Forestal Español* (junta de Andalucía, ed.). Granada. Mesa 3, pp. 116–120.
- Winer, N., (1980). The potential of the carob tree (*Ceratonia siliqua*). *Int. Tree Crops J.*, 1, 15–26.
- Zegaye, F., Khalid, A., Hasnaoui, A., Caid Serghini, H., El Amrani, A. (2012). Ectomycorrhization of date palm and carob plants. *GJSFRB*, 12(8), 13–20.
- Zouari, N., El Mtili, N. (2020). Effects of ectomycorrhizal fungal inoculation on growth and rooting of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *S. Afr. J. Bot.*, 135, 181–187.

5. Plantaciones de algarrobo en Andalucía

**Rafael M.^a Navarro Cerrillo
Guillermo Palacios Rodríguez
Miguel A. Lara Gómez
Inmaculada Clavero Rumbaó
Antonio Ángel García Mayoral
Juan Ortega Roperó
Mohamad Ali El Chami**

5.1. Introducción

Los sistemas naturales con presencia de algarrobo son, sin lugar a duda, uno de los sistemas forestales mediterráneos menos conocidos de la Península Ibérica, aunque representan un excelente ejemplo de equilibrio natural entre la explotación de los recursos naturales del bosque y su uso desde antiguo por parte del hombre. El algarrobo, como especie silvestre, constituye en la Península Ibérica un elemento botánico principal de las “manchas” mediterráneas. La mancha es un matorral arbustivo denso y monoestrato constituido por una mezcla irregular de especies de diferentes formas de vida, con predominio de esclerófilas. Entre ellas cabe citar la coscoja (*Quercus coccifera*), el madroño (*Arbutus unedo*), los labiérnagos (*Phillyrea latifolia* y *P. angustifolia*), el lentisco (*Pistacia lentiscus*) y la cornicabra (*Pistacia terebinthus*) (ver Cap. 1). Esta vegetación forma, con frecuencia, el subpiso o sotobosque del alcornocal y del encinar no continental derivado de la desaparición progresiva del estrato arbóreo sin que haya una variación significativa en la composición específica.

En condiciones ambientales muy favorables (suelos profundos y humedad ambiental alta), las manchas pueden alcanzar altura y porte arbóreos, pero, dado el fuerte grado de intervención actual (ej., incendios, sobrepastoreo, cambios de usos del suelo), han sido degradadas a manchas de menor talla o, incluso, a individuos aislados (grado de cobertura inferior al 75-80 %). Las manchas con dominancia de algarrobo dominan el paisaje en importantes sectores calizos de Cádiz (Zahara de la Sierra, El Acebuchal, Benalup de Sidonia, Alcalá de los Gazules, Caños de Meca, Tarifa, San Roque), muchas veces mezclados con la encina y el acebuche en formaciones más o menos adehesadas o arbustados en Cádiz (Jerez de la Frontera, Arcos de la Frontera, Embalse de Guadalcacín, sur de la S^a de la Sal, S^a de Dos Hermanas, S^a de las Cabras), Málaga (S^a Blanca, S^a Canucha, S^a de los Caballos), Sevilla (Lebrija, Las Cabezas de San Juan, Espera, S^a de Yegüas) y Huelva (río Viar). En otras ocasiones aparece como especie acompañante en litologías silíceas, menos favorables para su dominancia (umbría de la S^a del Valle, S^a de Algeciras, S^a Bermeja, S^a Labrada de Jerez), donde se mezcla con el alcornoque (*Quercus suber*) en situaciones termófilas e, incluso, con el quejigo (*Q. faginea*).

La actuación simultánea de los factores ambientales y antrópicos hace que el algarrobo ocupe una gran variedad de ambientes, formas vegetales y recursos (gradientes ambientales o de aridez, etc.). El resultado de esta heterogeneidad ambiental es la presencia del algarrobo en diferentes estructuras forestales. Sin embargo, las formaciones naturales de algarrobo están comprometidas por varios factores:

- pérdida de poblaciones y variedades singulares como consecuencia de diferentes factores de perturbación (ej., incendios, cambios de uso del suelo, intensificación de la agricultura, etc.),

- introgresión genética de las poblaciones por la introducción de materiales forestales no controlados,
- incremento de la incidencia de plagas y enfermedades emergentes y cambios en las condiciones ambientales (ej., oídio o sequías extremas),
- abandono casi total de las prácticas tradicionales de manejo del algarrobo.

El resultado final es que las formaciones naturales y las plantaciones tradicionales de algarrobo suelen presentar diferentes niveles de abandono y, en muchos casos, se han modificado las prácticas que promovían su mantenimiento y producción (Fig. 5.1). Las prácticas ganaderas o agrícolas que se desarrollan en la actualidad son, en gran medida, incompatibles con el establecimiento de nuevos ejemplares.



Figura 5.1. Diferentes estados de conservación de formaciones de algarrobo en Andalucía (de izquierda a derecha y de arriba a abajo): algarrobo con presencia de matorral y abundante regenerado (Cádiz); individuo de algarrobo integrados en el paisaje (Málaga); algarrobo como especie acompañante en acebuchales (Málaga); algarrobo en zonas áridas (Almería).

Hay pocos estudios que hayan abordado la conservación de las formaciones naturales o extensificadas del algarrobo en Andalucía (Millán et al., 2015). Sin embargo, todos ellos coinciden en señalar la dificultad que supone su conservación en la actualidad. Esta dificultad se debe, principalmente, a la competencia con otros usos del suelo, la sequía estival y los problemas asociados al envejecimiento de los árboles semilleros. En este contexto, se estima oportuno ofrecer una síntesis de los posibles modelos de establecimiento y gestión de plantaciones de algarrobo en Andalucía. El diseño de estos diferentes modelos surge de la necesidad de adoptar distintas estrategias en función del contexto ambiental y de la situación de la que se parte, pero, en todo caso, con el fin de promover, en la medida de lo posible, los valores que la especie puede aportar desde los puntos de vista socioeconómico, medioambiental y de fomento de la biodiversidad.

5.2. Antecedentes

5.2.1. El algarrobo en la forestación de tierras agrarias

La reforma de la PAC, aprobada en mayo de 1992, estableció un conjunto de medidas estructurales; entre otras, se formalizó en el Reglamento (CEE) 2080/92 por el que se estableció un régimen comunitario de ayudas a las medidas forestales en la agricultura. Sobre la base de esta norma, la Administración General del Estado, en colaboración con las Comunidades Autónomas y las Organizaciones de Productores Agrarios, desarrolló el Real Decreto 378/93 (y su correspondiente desarrollo normativos posteriores) y el Programa de Ayudas para fomentar inversiones forestales en explotaciones agrarias. A partir de la promulgación de los citados Reales Decretos, han sido las Comunidades Autónomas las responsables de su desarrollo y puesta en marcha, confiriéndoles este hecho la máxima responsabilidad y protagonismo (Vadell Guiral et al., 2019) (Fig. 5.2 y Fig. 5.3).

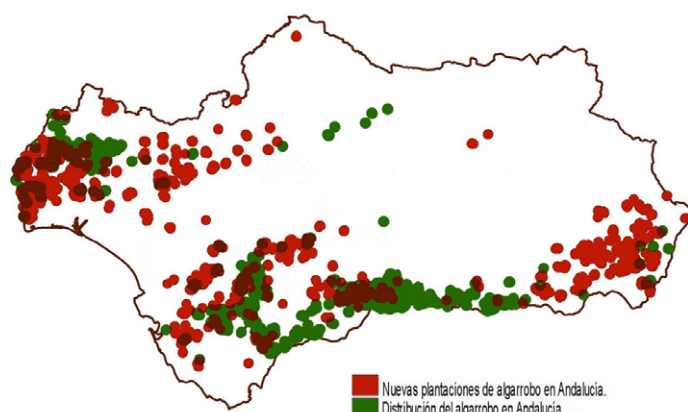


Figura 5.2. Distribución de los expedientes de forestación con algarrobo como especie principal o secundaria en Andalucía.

Gracias a esta normativa de fomento de la forestación de tierras agrarias, el algarrobo adquirió un mayor protagonismo en plantaciones en Andalucía, al ser una de las especies más utilizada en la región dentro de dicho programa. En este marco de ayudas se han repoblado en Andalucía, según datos recopilados por la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía, más de 250.000 ha entre 1993 y 2007, y se estima que el algarrobo representa entre el 8 y el 12 % de la superficie forestada (Junta de Andalucía, 2020). Las plantaciones se realizaron principalmente en las provincias de Huelva, Málaga, Granada, Almería y parte de Cádiz y Sevilla, siguiendo diseños de plantación de densidad intermedia (300 pies ha⁻¹), en plantaciones puras o mixtas (Tabla 5.1), de las cuales 1.162 ha se correspondieron con plantaciones puras de la especie.



Figura 5.3. Ejemplos de plantaciones de algarrobo en terrenos agrícolas en Andalucía.

El destino final de la mayor parte de estas plantaciones debería ser la restauración de plantaciones extensivas arboladas con algarrobo, promoviendo lo antes posible su uso silvopastoral mediante el aprovechamiento ordenado del arbolado para fruto y de la vegetación herbácea. Sin embargo, el abandono o el inadecuado mantenimiento de los trabajos de forestación, bien por problemas económicos o bien administrativos, pueden comprometer la viabilidad a largo plazo de muchos de los trabajos realizados.

Tabla 5.1. Plantaciones de algarrobo realizadas en el marco del desarrollo y aplicación en Andalucía del Reglamento (CEE) 2080/92 de la Unión Europea (fuente: Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural (Junta de Andalucía, 2020)).

Provincia	Expedientes puros	Expedientes mixtos	Puros (ha)	Mixtos (ha)	Total (ha)	Superficie (%)
Almería	6	155	146,53	5.619,55	5.766,08	21,64
Cádiz	2	52	132,35	1.240,62	1.372,97	5,15
Córdoba	0	5	0,00	145,67	145,67	0,55
Granada	2	2	23,29	58,84	82,13	0,31
Huelva	14	204	614,01	10.361,47	10.975,48	41,19
Jaén	0	2	0,00	48,12	48,12	0,18
Málaga	9	7	300,28	2.387,25	2.687,53	10,09
Sevilla	5	124	88,74	5.476,08	5.564,82	20,89
Total	48	621	1.305,21	25.337,59	26.642,79	100,00

5.2.2. Problemática específica para el establecimiento del algarrobo

La plantación del algarrobo integra diferentes prácticas de manejo y modelos de plantación. Sin embargo, el elevado costo de las prácticas de establecimiento de la especie, desde modelos muy extensivos (densificación de dehesas) hasta modelos más tecnificados (plantaciones de producción), hace necesario revisar la experiencia previa sobre este tipo de trabajos y tener claras las limitaciones que podrían hacer fracasar la actuación.

Las principales limitaciones relacionadas con el uso del algarrobo en plantaciones se pueden sintetizar en las siguientes:

- Condiciones edáficas y climáticas desfavorables. La frecuencia de años especialmente adversos desde el punto de vista climático, en particular durante el período de plantación y en los primeros años tras su establecimiento, es una de las principales causas de marras (Gómez y Elena-Roselló, 1997). El clima es, por tanto, uno de los factores que más condiciona el éxito de las plantaciones, si bien su efecto puede atenuarse con ciertas prácticas de plantación.
- Elección inadecuada de variedades. La incorrecta elección de la variedad, propiciada en ocasiones por forzar el uso de las más productivas, ha dado lugar a numerosos problemas de marras o crecimientos insuficientes.
- Calidad y procedencia de las plantas de vivero. La escasa información sobre la procedencia del material vegetal utilizado y la ausencia de unas exigencias mínimas sobre la calidad fisiológica de las plantas de vivero han comprometido (y pueden seguir haciéndolo en el futuro) el éxito de muchas plantaciones de algarrobo. La adecuada selección de la procedencia de los materiales forestales de reproducción y de la calidad funcional de las plantas de vivero pueden ayudar a minimizar los efectos de los factores limitantes durante la fase de arraigo y su adaptación a las condiciones ambientales de uso.
- Operaciones de preparación y plantación inadecuadas. La elección de los procedimientos de preparación del suelo, a veces por reducir costos o debido a que se asumen criterios técnicos discutibles, ha resultado clave en el fracaso de muchas plantaciones. En lo relativo a los trabajos previos, en concreto al tratamiento de la vegetación preexistente, hay que considerar la agresividad de la vegetación herbácea sobre las plantas recién establecidas, hecho que provoca

la muerte inmediata de las plantas o el retraso en su crecimiento. Por último, un factor poco controlado en muchas plantaciones ha sido la fecha de plantación, que ha mostrado tener un efecto muy importante en el éxito o fracaso de estas iniciativas.

- Inadecuado mantenimiento de las plantaciones. Por último, la ausencia o precariedad de los cuidados culturales (tipo, calidad y frecuencia) han dado lugar a porcentajes muy elevados de marras durante los años posteriores a la plantación. En particular, caben mencionar la importancia de las técnicas de mantenimiento del suelo, la protección de las plantas contra daños producidos por animales o agentes meteorológicos y el control de plagas y enfermedades.

5.3. Recomendaciones generales para las plantaciones de algarrobo

A modo de resumen, con objeto de promover el éxito de las plantaciones de algarrobo, se ofrecen a continuación algunas recomendaciones básicas que deben tenerse en cuenta en las fases de diseño, establecimiento y gestión:

1. Se debe elaborar un proyecto de plantación a nivel de finca y a escala de unidad de actuación (parcela), que defina la densidad objetivo y la programación espacial y temporal de las actividades a lo largo del ciclo productivo. Para ello, debe tenerse en cuenta que numerosos trabajos han demostrado que las plantaciones de algarrobo requieren cuidados culturales específicos y periodos de establecimiento de entre 3 y 5 años.
2. La plantación con algarrobo debe responder a una programación meditada que identifique las zonas con mayor potencial productor (exposición, pendiente, calidad y profundidad del suelo, etc.), el diseño en función del objetivo, la densidad, la distribución de los polinizadores, etc.
3. Se recomienda establecer densidades específicas según cada modelo agroeconómico, una vez se haya finalizado el periodo de establecimiento, con el fin de seleccionar y favorecer un patrón regular que optimice la producción y facilite el manejo de la plantación.
4. Se deben seleccionar adecuadamente los materiales forestales de reproducción (plantas de vivero, portainjertos, púas). Si se va a utilizar plantas de vivero, adecuar sus características al tipo de plantación, pudiéndose usar plantones de dos savias, cuando se usen densidades elevadas, o bien plantones de mayor tamaño en labores de densificación o enriquecimiento a baja densidad (ver capítulo 4).
5. Es fundamental adecuar el procedimiento de preparación del suelo, que debe ser siempre mecanizado, al objetivo de la plantación. Por ejemplo, cuando se usen plantas de gran tamaño (altura mayor de 1 m y envases de más de 2 litros) se deben realizar preparaciones profundas (> 60 cm); en plantaciones de producción (extensiva e intensiva) se deben llevar a cabo preparaciones mecanizadas intensas, como el subsolado. La época de plantación será preferentemente en otoño o invierno, con suelo en tempero, y siempre que no haya riesgo de heladas severas durante el invierno.
6. Con el fin de evitar daños a las plantas jóvenes (ej., roedores, radiación), se pueden utilizar protectores individuales (ej., tubos protectores). Los protectores

deben tener las características (altura, material, ventilación, etc.) propias de los usados en cultivos leñosos.

7. Una vez garantizada la supervivencia de las plantas, se les debe dar los cuidados culturales adecuados, principalmente de protección, de eliminación de la competencia herbácea y la aplicación de riegos cuando estos sean necesarios. Se deben realizar escardas en primavera, o bien utilizar *mulch* orgánicos o de plástico si la competencia herbácea es muy elevada, aprovechando este momento para preparar un alcorque que facilite los riegos estivales. Se recomienda aplicar entre 1 y 5 riegos estivales durante los primeros 5 años.
8. Se deben realizar podas de formación desde edades muy tempranas (a partir del 3-5 año) con el fin de ir formando al árbol y evitar malas conformaciones iniciales.

5.4. Modelos de restauración del algarrobo

Las zonas de establecimiento potencial del algarrobo se han descrito en capítulos previos (Cap. 1 y Fig. 5.4). La gran amplitud ecológica de la especie y su distribución en todas las provincias de Andalucía permite su establecimiento en muchas zonas de la región (Ruiz de la Torre, 2006). Sin embargo, esta amplitud hace recomendable establecer una tipología de plantaciones posibles, en las que la importancia de los diferentes valores que es capaz de aportar la especie se verá modulada por el entorno abiótico.

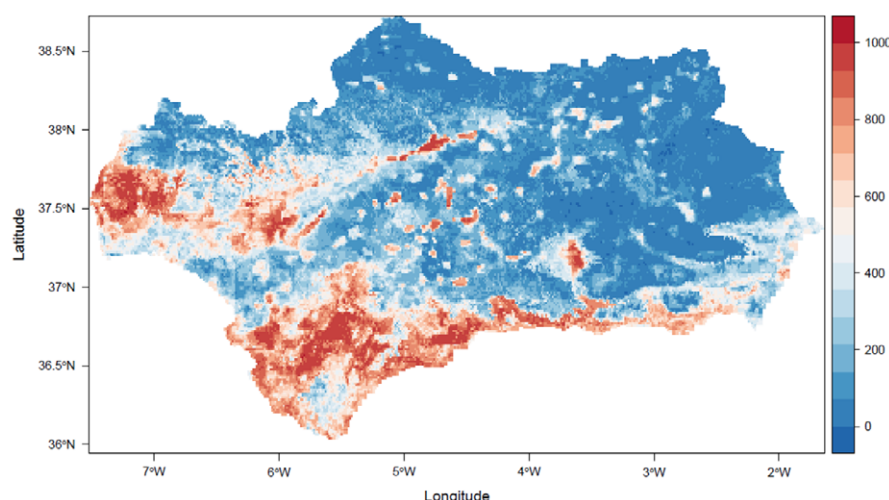


Figura 5.4. Mapa de potencialidad del algarrobo en Andalucía (QUERAT, 2024).

La elección del modelo de plantación del algarrobo depende de los factores del medio físico (climáticos, edáficos, estados erosivos, etc.), agrosilvopastorales (edad, densidad, distribución, forma fundamental y principal, etc.) y del uso de la finca (estado fitosanitario y de vigor del arbolado, usos previos del suelo, etc.). Por ello, al abordar un proyecto de plantación con esta especie conviene hacer previamente un diagnóstico de las causas principales que limitan su establecimiento con el fin de buscar modelos agronómicos compatibles con la complejidad ecológica y socioeconómica de cada sistema productivo.

Los modelos posibles de uso del algarrobo en plantaciones, en la mayoría de ellos como especie principal, se pueden resumir en los siguientes:

Modelos de producción

MP 1. Densificación o enriquecimiento de dehesas en áreas afectadas por problemas de mortalidad del arbolado, pero donde se quiera mantener las actividades productivas. En estos casos se procede a incrementar el número de individuos mediante la protección de plantas individuales o mediante la creación de acotados parciales (dehesas con presencia previa de la especie), o a través de la introducción artificial de un número relativamente bajo de individuos por unidad de superficie (hasta un máximo de 50 plantas ha⁻¹), incluyendo, en ambos casos, una adecuada ordenación del pastoreo.

MP 2. Mejora de plantaciones del programa de forestación con potencial aprovechamiento mixto de algarroba y, ocasionalmente, ganadero. El objetivo es mejorar la capacidad productiva de antiguas plantaciones de algarrobo en terrenos agrícolas mediante la regulación de la densidad y la mejora de la calidad varietal de los individuos. En estos casos se elimina una parte de los pies preexistentes teniendo en cuenta criterios de espaciamiento, sexo y calidad productiva, hasta una densidad de 150-200 pies ha⁻¹ y, posteriormente, se procede a efectuar injertos de los pies con variedades de mayor interés productivo.

MP 3. Plantaciones extensivas de nuevo establecimiento. Se trata de establecer plantaciones nuevas, bien de secano o bien con riego, orientadas a la producción agronómica del algarrobo. Al ser plantaciones diseñadas específicamente para optimizar la producción, la densidad, la selección varietal, las técnicas de establecimiento y los cuidados culturales deben efectuarse acordes con ese objetivo.

MP 4. Plantaciones tecnificadas de algarrobo. En este caso, el objetivo es realizar plantaciones nuevas orientadas a maximizar la producción agronómica del algarrobo siguiendo el modelo de las plantaciones intensivas de olivar. Al estar diseñadas específicamente para optimizar la producción, la densidad, la selección varietal, las técnicas de establecimiento y los cuidados culturales se efectúan siguiendo modelos propios de la intensificación de cultivos leñosos (ej. olivo y almendro), y siempre con riego.

Modelos de restauración

MR 1. Recuperación de áreas degradadas mediante el establecimiento de plantaciones puras o mixtas con funciones protectoras. En conjunto, estas formaciones contribuyen al control de los procesos erosivos y al aumento de nichos ecológicos para la promoción de una flora y una fauna más diversas.

MR 2. Plantaciones en sistemas de “recolección de agua” (oasificación) en trabajos de restauración en zonas áridas y semiáridas (Navarro Hevia et al., 2014).

MR 3. Diversificación de paisajes agrícolas con objeto de favorecer los procesos de restauración de la vegetación y la densificación de cubiertas. Estos objetivos son particularmente importantes en las repoblaciones en zonas de menor diversidad, donde las plantaciones de algarrobo pueden contribuir a formar mosaicos de vegetación con una función crucial en la recuperación de la biodiversidad (Sánchez-Oliver et al., 2014).

Cualquiera sea el modelo elegido, deben llevarse a cabo las actuaciones necesarias para favorecer el establecimiento del arbolado, así como los cuidados culturales que aseguren el arraigo. Para ello, salvo algunos comentarios específicos que se citan más adelante, remitimos al libro Bases técnicas y ecológicas de los proyectos de plantación forestal (Pemán et al., 2021; <https://cpage.mpr.gob.es/producto/bases-tecnicas-y-ecologicas-de-los-proyectos-de-repoblacion-forestal/>).

5.5. Modelos de producción

5.5.1. Modelo MP1. Densificación o enriquecimiento de dehesas

Objetivo y descripción del modelo

El objetivo de estas plantaciones es restaurar y mejorar el estado vegetativo y productivo de dehesas de encina y alcornoque que han experimentado una pérdida importante de individuos como consecuencia de daños por plagas y enfermedades; por ejemplo, en dehesas afectadas por seca. El modelo favorece los procesos de restauración del arbolado y la densificación del dosel, así como la diversidad y resiliencia del estrato arbóreo.

Se trata de plantaciones de enriquecimiento del dosel arbóreo de la dehesa mediante la introducción del algarrobo, especie que normalmente no se presenta en este tipo de formaciones. La plantación se debe realizar con materiales seleccionados, en concreto con cultivares de vigor alto, con marcos de plantación a muy baja densidad (< 50 pies ha^{-1}), y con producciones destinadas al complemento alimentario del ganado o a la cosecha “informal” de algarrobas. Este sistema comparte modelos agrosilvopastoriles ampliamente usados en Andalucía, y se basa en la incorporación del algarrobo en la dehesa como un elemento productivo singular.

El establecimiento en estas condiciones es sencillo dada la plasticidad de la especie y su facilidad para ocupar terrenos de baja productividad. Contribuye a la estabilidad de las dehesas, creando estructuras más complejas que aprovechan la heterogeneidad propia de estos paisajes conformados como mosaicos productivos. Las dehesas mixtas optimizan la protección del suelo, la lucha contra la desertificación y las perturbaciones (ej., incendios o sequías) y contribuyen a preservar el suelo y la biodiversidad, diversificando los servicios ambientales. El algarrobo favorece la mejora de los pastizales y los usos ganaderos, contribuyendo a la revalorización de estos terrenos y a paliar la elevada pérdida de árboles que presentan muchas dehesas. Igualmente, ayuda a mejorar su estructura y, por lo tanto, su capacidad productiva. La abundante producción de frutos que mantiene el algarrobo en la copa y que van cayendo a lo largo de prácticamente todo el año, hace de esta especie un elemento importante en dehesas muy degradadas, donde contribuye a la alimentación de la fauna doméstica y silvestre.

Área potencial de implantación

Las áreas de mayor potencial para el establecimiento de plantaciones de algarrobo con objetivo de enriquecimiento de dehesas se corresponden con las provincias de Córdoba, Sevilla, Huelva y Cádiz (Fig. 5.5) (Ruiz de la Torre, 2006), coincidiendo con la asociación de esta especie con las dehesas de encina y, en menor medida, de alcornoque, donde ya aparece de forma ocasional junto con el cortejo de otras

especies forestales (peral silvestre, acebuche) o matorrales/arbustos mediterráneos (madroñales, lentiscales, etc.). Se trata de zonas con climas mediterráneos típico (IV2 y IV4 y, en menor medida, IV2) con una temperatura media invernal en torno a 10 °C y una temperatura media estival no inferior a 20 °C durante, al menos, cuatro meses al año (Ruiz de la Torre, 2006). En este modelo se debe evitar establecer el algarrobo en áreas con temperaturas inferiores a 0 °C (-4 °C) y con pluviometrías anuales inferiores a 300 mm (Tous y Franquet, 2024).

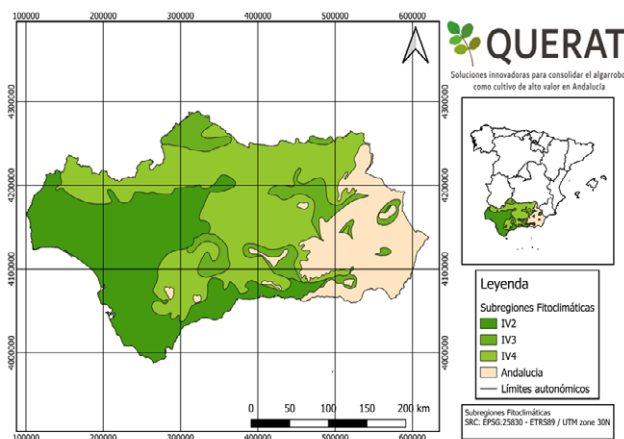


Figura 5.5. Subregiones fitoclimáticas (Allué Andrade, 1990) óptimas para las plantaciones de algarrobo con objetivo de enriquecimiento de dehesas.

Establecimiento

En las actuaciones de enriquecimiento de dehesas, por las particularidades de este tipo de explotaciones con densidad del arbolado entre 60-90 pies ha⁻¹ y prioridad del uso ganadero, el algarrobo suele establecerse sobre dehesas que ya han perdido un gran parte del arbolado de la especie principal (encina o alcornoque, principalmente) y tienen una densidad baja (< 30 pies ha⁻¹). En este caso hay que realizar la plantación en los terrenos donde las especies principales de la dehesa, en particular la encina, presentan problemas de marginalidad física o económica por presencia de agentes bióticos (*Phytophthora cinnamomi*, insectos xilófagos) y por peor calidad de suelo (pedregosidad, suelos pesados) buscando alcanzar una densidad final del componente arbóreo en torno a 80-100 pies ha⁻¹.

La incorporación del algarrobo supone una cierta compensación (adaptabilidad) económica que otorga capacidad productiva a las explotaciones que, junto a la asunción de un mínimo de cuidados culturales, permite el mantenimiento de su vocación silvopastoral. El resultado final es una dehesa mixta donde el algarrobo aparece en su interior en forma de pies dispersos o agrupados en las localizaciones de menor vocación productiva (zonas de drenaje donde la encina o el alcornoque han desaparecido, zonas de alta pedregosidad), dejando sin transformar las áreas con arbolado preexistente. En las actuaciones de enriquecimiento de dehesas se recomienda introducir un número bajo de plantas (< 50 plantones ha⁻¹), con pies distribuidos al azar o en forma de bosquetes en función de los micrositios más adecuados y la distribución de la especie dominante y donde se haya perdido el arbolado de la especie principal (Fig. 5.6). Esta densidad se puede aumentar progresivamente hacia las partes de mayor producción (< 120 pies ha⁻¹) que se dejarían para las especies ya existentes propias de la dehesa (encina o alcornoque) (Fig. 5.7). La estructura creada consigue proporcionar una dehesa más diversificada y compleja, tanto desde el punto de vista de la biodiversidad como de la capacidad productiva, al ampliar la producción y temporalidad de frutos, el período de floración,

etc. Al ser moderada la competencia, las plantas se mantienen con un elevado vigor vegetativo y una buena capacidad de producción.



Figura 5.6. Dehesas mixtas de encina con presencia de algarrobo (QUERAT, 2024).



Figura 5.7. Plantación de algarrobo con objetivo agrosilvopastoral (QUERAT, 2024).

El método de establecimiento recomendado para el algarrobo en trabajos de enriquecimiento de dehesas es la plantación manual. Resulta fundamental la elección de los materiales de base y de las plantas de vivero para asegurar el éxito de la plantación (ver Cap. 2 y 4). En el caso de plantaciones de enriquecimiento de dehesas se recomienda elegir un material vegetal diverso. En plantaciones en dehesas, donde las posibilidades de cuidados culturales son relativamente limitadas, la plantación debe hacerse en otoño o primavera (dependiendo del riesgo de heladas) evitando retrasos que pueden comprometer su supervivencia, en particular en suelos muy pedregosos o de escasa profundidad efectiva.

Las características de la planta tipo de algarrobo para labores de restauración de dehesas son plantones de una o dos savias sin injertar en contenedor de gran volumen ($> 1000 \text{ cm}^3$) que se injertan en campo pasado un año, o bien planta directamente injertada en vivero. No existen recomendaciones específicas sobre las variedades más adecuadas para este tipo de trabajo, por lo que se puede usar una

variedad con un amplio espectro productivo y fenológico (ej., Sayalonga), o bien seleccionar material local. Para mejorar la producción de frutos dentro de la dehesa se puede optar por injertar en campo sólo los machos a una altura superior al diente del ganado, bajando así la ratio de machos a un 10-15 %. Esta opción mantiene una mayor diversidad que la instauración de planta ya injertada desde el principio.

En dehesas no suele ser necesario realizar un tratamiento previo de la vegetación, dado que presenta un tapiz herbáceo con poca presencia de matorral (Fig. 5.8). Resulta adecuado mecanizar la apertura de hoyos, con retroexcavadora agrícola o con subsolador.



Figura 5.8. Plantación de densificación de dehesas con algarrobo en la provincia de Cádiz (QUERAT, 2022).

En términos prácticos, en parte para compensar el estrés asociado al establecimiento de los plantones, en el enriquecimiento de dehesas es muy frecuente el uso de tubos invernadero y mallas ganaderas, ya que, además de la protección física que dan a

la planta, mejoran sus expectativas de arraigo y su crecimiento en altura. En este sentido, se ha constatado que el tubo invernadero mejora la dominancia apical del algarrobo y favorece su supervivencia (Oliet et al., 2003). Puede ser recomendable el uso de *mulch* orgánico para evitar la competencia herbácea o complementar su uso con binas. En repoblaciones de densificación no es necesario el control de la competencia ni la fertilización de la plantación una vez establecida; tampoco son estrictamente necesarias las podas de formación. En la tabla 5.2 se resumen las características básicas, las principales actuaciones para el establecimiento y manejo de este modelo de plantaciones de algarrobo.

Tabla 5.2. Resumen de actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo con objetivo de densificación y enriquecimiento de dehesas.

Características generales	
Estación	Climas mediterráneos típico (IV2 y, en menor medida, IV3 y IV4), en zonas libres de heladas
Objetivos	Restauración de dehesas de encina y alcornoque
Características genéticas de la planta	Procedencia local según regiones de identificación y utilización: Orla meridional de la depresión del Guadalquivir (41), Serranía de Ronda (42), Depresión del Guadalquivir (44) y Sierra Morena meridional (45)
Planta tipo	1-2 savia en envases forestales (500-1000 cm ³) (25-50 cm de altura)
Procedimiento de preparación	
Fecha de plantación	Otoño o primavera, dependiendo del riesgo de heladas
Tratamiento previo de la vegetación	Simultaneo a la plantación
Preparación del suelo	Ahoyado con retroexcavadora o subsolador
Diseño de la plantación	Enriquecimiento o densificación (< 50 plantas ha ⁻¹).
Cuidados culturales después de la plantación	
Protección	Tubos invernaderos perforados o tubos ganaderos. Mallas de sombreo
Riegos	Riego de establecimiento
Reposición de marras	Primer año
Escardas y binas	Escardas manuales
Manejo de la plantación	
Control de la competencia herbácea	Sin control de la competencia
Conformación de la copa	Podas de formación y de fructificación
Fertilización	Sólo fertilización en el momento de la implantación

El algarrobo es una especie que, en este tipo de explotaciones, presenta una baja incidencia de plagas y enfermedades, debido principalmente al ambiente seco donde se implantan. La enfermedad de mayor relevancia es *Pseudoidium ceratoniae* (*Oidium ceratoniae*), causante del “mal blanco” (oídio) (Trapero et al., 2022). El hongo ataca las hojas, las yemas jóvenes y los frutos inmaduros ocasionando reducciones de la producción. *Pseudocercospora ceratoniae* (cercosporosis) es otro patógeno ampliamente distribuido, que provoca necrosis típicamente punteadas, en ocasiones amplias, sobre las hojas, dando lugar a defoliaciones, a veces generalizadas, de la copa. Otras enfermedades a tener en cuenta pertenecen a los géneros *Phyllosticta*, *Ramularia*, *Alternaria*, *Colletotrichum*, *Dothiora* y *Septoria*; hongos responsables de manchas foliares (mancha negra foliar) que, a menudo, provocan defoliaciones y daños en las ramas. Ocasionalmente se han señalado

daños por *Armilaria mellea* y *A. obscura*, así como alteraciones provocadas por la bacteria *Pseudomonas syringae* pv. *ciccaronei* (necrosis bacteriana aislada en Italia). Es muy sensible a las heridas en madera gruesa. Cuando el daño por rotura o caída es severo, se desarrollan con facilidad podredumbres y oquedades de cierta entidad adquiriendo el árbol, con el tiempo, un aspecto envejecido. El agente causal más importante es la podredumbre roja o carcoma (caries) provocada por el hongo oportunista *Polyporus sulphureus*. Su ataque resulta en un acorchamiento de color rojizo en el interior de las ramas gruesas, que puede favorecer su rotura (Trapero et al., 2022).

Parcela demostrativa MP1: finca Huerta Los Tamayos (Prado del Rey, Cádiz)

Caracterización ambiental de la zona de restauración

Esta parcela demostrativa de densificación y enriquecimiento de dehesas se encuentra en el término municipal de Prado del Rey (Cádiz). La zona se caracteriza por un fitoclima IV4 Mediterráneo (Tabla 5.3). La vegetación potencial se corresponde con el área de

distribución de los lentiscales, coscojares, acebuchales, y encinares. La parcela se encuentra sobre cambisoles cálcicos y regosoles calcáreos con litosoles, fluvisoles calcáreos y cambisoles vérticos, con un suelo de poca profundidad. En la actualidad el paisaje está dominado por cultivos agrícolas herbáceos y leñosos de secano junto con pastizales arbolados con explotación ganadera.

Se trata de una finca agrícola destinada a huerta ecológica, donde la propiedad ha orientada el uso hacia la diversificación de cultivos mediante la densificación del olivar tradicional (Fig. 5.9) y de una zona de dehesa con muy baja densidad de encina (Fig. 5.10). Con este fin, se procedió al enriquecimiento mediante la plantación de algarrobo y el aprovechamiento extensivo con ganado ovino. En el año 1992, se realizaron las plantaciones en la zona de olivar de secano usando un marco de 14 x 14 m y plantando algarrobos entre las líneas de olivos. Los algarrobos se injertaron posteriormente con cultivares tradicionales de la zona. Cinco años después se realizó el enriquecimiento de una zona de dehesa de encina usando un marco de plantación de 7 x 7 m según curvas de nivel. Al igual que en el caso del olivar, posteriormente se injertaron los pies con cultivares locales (Fig. 5.11).

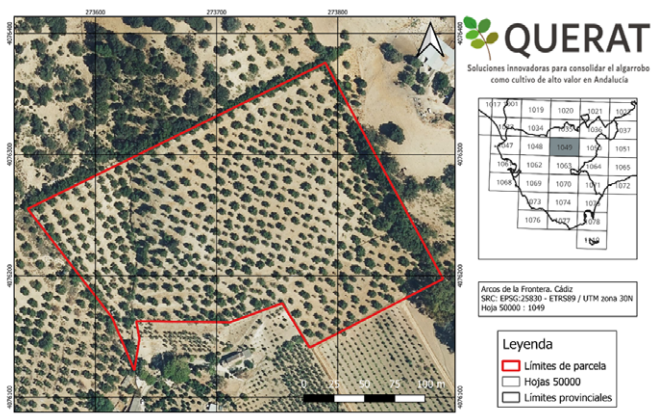


Figura 5.9. Límites de la plantación de algarrobos para la diversificación de paisajes agrícolas en la Huerta Los Tamayos (Prado del Rey, Cádiz).

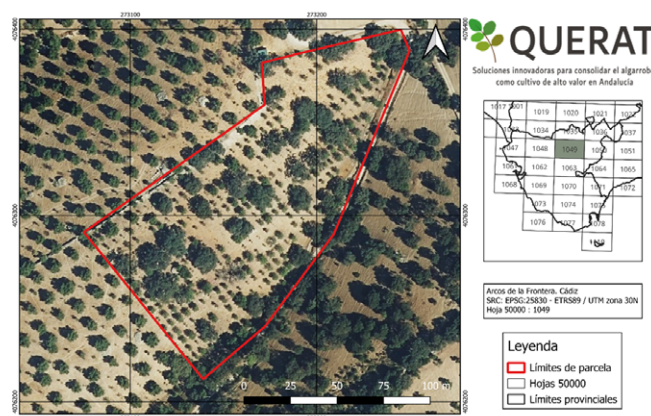


Figura 5.10. Límites de la plantación de algarrobos para la densificación y enriquecimiento de dehesas en la Huerta Los Tamayos (Prado del Rey, Cádiz).

Tabla 5.3. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca Huerta Los Tamayos (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
800-1200	4-6	32-36	17-19	800-900



Figura 5.11. Densificación y enriquecimiento de dehesa con plantación de algarrobo en la finca Huerta Los Tamayos (QUERAT, 2024).

Actuaciones

La preparación del suelo en ambas parcelas se realizó mediante ahoyado manual de 40 x 40 x 40 cm. El control de la vegetación herbácea se mantuvo gracias al diente de ganado ovino. El material de reproducción utilizado fue planta en formato “forestal” con un tamaño inicial de 40-50 cm de altura. La plantación se realizó de forma manual en el hoyo de plantación y a unos 20 cm de profundidad efectiva.

Se optó por limitar los trabajos culturales a los mínimos requeridos para garantizar el arraigo y el crecimiento de las plantas y alcanzar el objetivo de la plantación. También son mínimos los trabajos posteriores de mantenimiento:

- Protección. Se utilizaron protectores verticales de plástico semirrígido perforado para el control de los daños por herbívora (ovejas), que se fueron subiendo en altura conforme la planta crecía para evitar daños por diente del ganado.
- Riegos. La plantación recibió riegos de establecimiento durante los dos primeros años con tractor y depósito de 2000 litros dando tres riegos de 50-80 litros planta en el verano.
- Laboreos. No se realizaron labores mecánicas, sólo el control de herbáceas con ganado.
- Conformación y guiado. Se llevaron a cabo podas de formación para obtener, lo más rápidamente posible, el tamaño ideal para efectuar los injertos. Una vez injertados los árboles, se realizó una poda tradicional de formación para mejorar la producción. al mismo tiempo que se realizaban las primeras podas, se colocaron tutores de 1,5 m.
- Injertado. La planta se injertó conforme iban superando la altura de diente del ganado (1,6-1,8 m). Se realizó un injerto de escudete con material de cultivares tradicionales de la zona.
- Otros cuidados en la implantación. No se utilizó en ningún caso ni hidrogel, así como tampoco enmiendas o fertilizaciones, salvo la incorporación de estiércol al suelo. Se tapó la zona regada con un *mulch* de heno para disminuir la evapotranspiración de la capa superficial.

- Protección contra incendios. Una vez se logrado el control de la competencia de la vegetación durante los años posteriores a la plantación, el suelo se mantiene mediante un pastoreo con baja carga ganadera. No se realiza mejora del estrato herbáceo.
- Eliminación de pies muertos. Se van eliminando los pies que mueren por diferentes causas.

Estado actual

En la actualidad (2024), la plantación está formada por individuos de algarrobo de 32 y 27 años, con una densidad en torno a 100 pies ha⁻¹ junto con las encinas antiguas. La talla de los árboles oscila entre 4,50 y 7 m de altura y 15 a 25 cm de diámetro normal. Un 90 % de los árboles ha sido injertado con cultivares hembras y hermafroditas de la zona, y el 10 % restante con machos.

La producción de la plantación es irregular, ya que muestra vecería; casi siempre con un año con menor producción seguido de otro con una buena carga de algarroba. La algarroba producida en esta finca tiene mayor rendimiento de pulpa que de garrofín, si se la compara con la de poblaciones cercanas, al haberse injertado con cultivares tradicionales seleccionados para la alimentación del ganado (Fig. 5.12, Tabla 5.4).



Figura 5.12. Detalle de frutos de algarrobos recolectados en la finca (QUERAT, 2024).

Tabla 5.4. Características de fruto en la parcela de la finca Huerta Los Tamayos en la cosecha del verano de 2022.

Caracterización de los frutos	
Longitud de la vaina (cm)	13,28
Peso de la vaina (g)	12,05
Rendimiento en garrofín (%)	16,85
Peso de 100 semillas (g)	18,62

Parcela demostrativa MP1: finca El Hondón (Benaocaz, Cádiz)

Caracterización ambiental de la finca

Esta parcela se encuentra en el término municipal de Benaocaz (Cádiz, Fig. 5.13). Se trata de una antigua finca agrícola de cultivo de cereal con algarrobos y olivos viejos que, desde hace más de 60 años, se ha destinado al aprovechamiento ganadero convirtiéndose en una dehesa. Tradicionalmente se ha aprovechado la algarroba como suplemento para el

ganado y para la venta. La zona tiene pendientes suaves (10 %-20 %), y se caracteriza por un fitoclima IV4 Mediterráneo (Tabla 5.5), con precipitaciones que se distribuyen desde 1200 mm a 1600 mm medios anuales. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución de los lentiscales, coscojares, acebuchales y encinares, sobre cambisoles cálcicos y calcáreos con litosoles, fluvisoles calcáreos y cambisoles vérticos de bastante profundidad efectiva. En la actualidad, el paisaje está dominado por zonas adehesadas con aprovechamiento ganadero y huertas familiares en terrazas limítrofes al río.

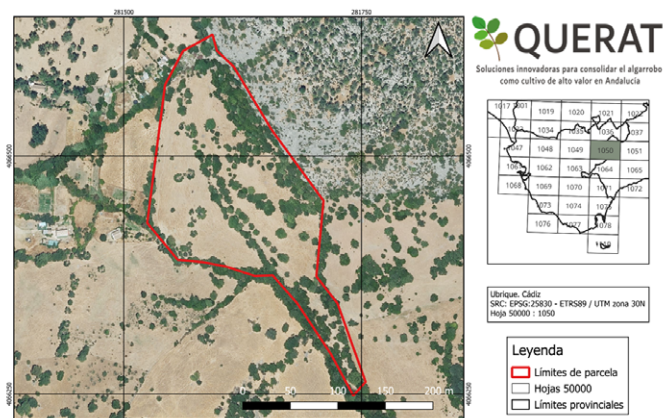


Figura 5.13. Localización y perímetro de la plantación mixta adehesada de algarrobo en la finca El Hondón (Benaocaz, Cádiz).

Tabla 5.5. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca El Hondón (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
1200-1600	4-6	32-36	17-19	900-1000

Actuaciones

El estado actual de esta finca se ha ido conformando por las diferentes actividades agroganaderas hasta convertirla en una dehesa de acebuche enriquecida con algarrobo (Fig. 5.14). Hasta 1964 esta finca se cultivaba con cereal, con presencia en los majanos de olivos y algarrobos que se iban iniertando con cultivares locales para la alimentación del ganado. A partir de dicho año, la finca se cambió a explotación ganadera caprina, bobina y porcina, lo que favoreció la aparición espontánea de plantas de acebuche y de algarrobo procedentes de semilla. Los algarrobos se siguieron injertando hasta la década de los 90 para su aprovechamiento ganadero, o para la venta cuando lo justificaba su precio. En esta finca, por tanto, nunca se ha plantado algarrobo; los individuos provienen de regeneración natural. Las prácticas culturales son iguales a la finca El Rano (Ubrique, Cadiz), previamente descrita.



Figura 5.14. Dehesa de acebuche y algarrobo en la finca El Hondón (QUERAT, 2024).

Estado actual

En la actualidad la población de algarrobo conforma una dehesa adulta junto con acebuche, estando los pies más antiguos injertados y los más jóvenes a la espera de injertar. La densidad promedio de machos es de 2 pies ha⁻¹, aunque con densidad variable dado su origen natural. La talla de los ejemplares de algarrobo oscila entre 8 y 18 m de altura y diámetros desde 50 cm a 2,5 m en la base. Cuando los árboles se mantenían podados, la producción era bastante estable, oscilando la carga entre 50 y 300 kg por árbol, aunque con años veceros. El abandono de las prácticas de poda ha dado lugar a la reducción de la producción y al aumento de la vecería (Tabla 5.6, Fig. 5.15).

Tabla 5.6. Características de fruto en la parcela de El Hondón en la cosecha de los veranos de 2019 y 2023.

Caracterización de los frutos		
	Injerta	Costillenta
Longitud de la vaina (cm)	16,7	10,6
Peso de la vaina (g)	11,90	3,14
Rendimiento en garrofín (%)	14,92	26,16
Peso de 100 semillas (g)	17,78	12,40



Figura 5.15. Detalle de frutos de variedades tradicionales presentes en la finca.

5.5.2. Modelo MP2. Mejora de plantaciones del programa de forestación

Objetivo y descripción del modelo

El objetivo de estas explotaciones es mejorar la capacidad productiva de las plantaciones de algarrobo realizadas en el programa de forestaciones de tierras agrarias (Vadell et al., 2019). Debido al diseño original de las plantaciones (~300 pies ha⁻¹, con baja selección del material de base, abandono de los cuidados culturales, etc.), estas plantaciones requieren optimizar su capacidad productiva a partir de la mejora de las prácticas agronómicas. En la actualidad existen aproximadamente 1500 ha de plantaciones puras de algarrobo en Andalucía que son susceptibles de este tipo de actuaciones. En concreto las prácticas recomendadas son: el injerto de pies con variedades de vigor alto, la mejora de la ratio de sexos mediante la reducción del número de pies masculinos,

la realización de podas de fructificación, la regularización de los marcos de plantación (< 200 pies ha^{-1}) que facilite una mínima mecanización de la cosecha y la aplicación de técnicas de conservación del suelo que posibiliten la mejora y optimicen la producción. Se trata de transformar plantaciones extensivas de baja producción a plantaciones productivas, reduciendo, en lo posible, el coste total de producción.

Área potencial de implantación

En Andalucía, las forestaciones de algarrobo se establecieron, por lo general, sobre terrenos agrícolas en proceso de abandono o de baja productividad, pero con condiciones adecuadas para la mecanización de las preparaciones del suelo. Estas plantaciones se realizaron en todas las provincias de Andalucía, principalmente en Huelva, Cádiz y Almería, aunque con presencia en Sevilla y Málaga, ocupando localizaciones con climas mediterráneo genuino cálido (o moderadamente cálido), seco (menos seco), con inviernos cálidos o tibios (IV2, IV3 y IV4, lentiscales, coscojares, acebuchales). Las zonas con mayor potencial para la mejora productiva de expedientes de forestación se encuentran en zonas con una pluviometría anual superior a 400 mm (Ruiz de la Torre, 2006) (ver Fig. 5.5).

Gestión para la mejora productiva de las plantaciones

La densidad de algarrobo en plantaciones procedentes de forestación oscila entre 150 y 220 pies ha^{-1} , siendo las densidades originales de 300 pies ha^{-1} , e incluso mayores. A partir de esta situación, la mejora de la producción está ligada a la implantación de prácticas agronómicas que consigan optimizar el manejo de los árboles ya existentes (Fig. 5.16); en concreto:

- Seleccionar e injertar la variedad o cultivar más adecuado para asegurar el éxito productivo de la plantación (ej., Matalafera, Melera, Rojal, Duraió, Sayalonga, entre otras). Es la labor más costosa y, además, condiciona la vida productiva de la plantación.
- Adoptar un ratio hembra / macho adecuado (ej., 1:8 como mínimo).
- Regular la densidad de la plantación según la variedad y el sistema de manejo (6 x 8 m; 9 x 10 m). En plantaciones procedentes de forestación seguramente será muy difícil superar los 200 pies ha^{-1} , distribuidos a marco irregular por curvas de nivel (Spina, 1989; Tous y Franquet, 2024). Es importante tener presente que no es necesario eliminar todos los pies improductivos, al menos en su totalidad, sobre todo los que ocupan estaciones de escasa calidad e interés protector, ya que no interfieren en exceso en la capacidad productiva de la plantación y pueden actuar como polinizadores.
- Realizar podas de formación y fructificación para conformar la copa de los árboles productivos (formación en “vaso”), así como para eliminar ramas muertas o enfermas y mejorar la aireación y la penetración de la luz.
- Controlar las plagas y enfermedades mediante una revisión regular de la plantación para detectarlas de forma temprana. En los que respecta a la incidencia de plagas y enfermedades, se recomienda consultar lo desarrollado en el modelo MP1.
- Manejar el suelo y la cubierta vegetal por prácticas tradicionales de cultivo (laboreos) o mediante cubiertas vegetales tendentes a mejorar la estructura del suelo, la retención de humedad y la biodiversidad.
- Implantar métodos de cosecha eficientes, preferiblemente mecanizados.

Las plantaciones de algarrobo procedentes de forestación tienen la ventaja de su estabilidad, dado que la mayor parte de ellas superan los 20 años, por lo que presentan una gran resistencia a la sequía debido a la gran rusticidad de la especie. Por el contrario, presentan un crecimiento desigual y no suelen tener producciones superiores a 2000 kg ha⁻¹, salvo si se realizan acciones de mejora.

El rápido crecimiento del algarrobo ha propiciado en estas explotaciones la existencia de árboles de gran porte que exigen podas severas para mejorar su forma, adaptándola a las necesidades de mecanización de la explotación (Fig. 5.17). Debido a la fuerte dominancia apical, el injerto en la cruz permite la elección de un sistema de ramas principales en número variable, sobre las que armar algunos pisos de ramas secundarias, configurando finalmente una copa de desarrollo libre. Un aspecto importante que debe considerarse es la tendencia del algarrobo a fructificar sobre madera vieja (ramas y tronco), manteniendo la cosecha en el interior de la copa, cerca de los pisos secundarios. Este comportamiento debe considerarse a la hora de realizar las consiguientes podas o renovaciones de ramas productivas.

En la tabla 5.7 se resumen las principales actuaciones para el establecimiento y el manejo de plantaciones de algarrobo.



Figura 5.16. Forestación de tierras agrarias de algarrobo en producción (QUERAT, 2024).



Figura 5.17. Forestación de tierras agrarias de algarrobo sin cuidados culturales (izq.); ejemplar de dicha forestación sin formación ni limpieza (dcha.). (QUERAT, 2024).

Tabla 5.7. Resumen de actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo en forestaciones sobre tierras agrarias.

Características generales	
Estación	Climas mediterráneos típico (IV2 y, en menor medida, IV3 y IV4), en zonas libres de heladas
Objetivos	Maximizar la producción de antiguas forestaciones
Características genéticas de la planta	Variedades o cultivares seleccionados
Planta tipo	No hay plantación
Procedimiento de preparación	
Fecha de plantación	Puede no ser necesario realizar plantaciones nuevas
Tratamiento previo de la vegetación	Gradas
Preparación del suelo	No es necesario
Diseño de la plantación	Marco regular (< 200 plantas ha ⁻¹), en función del marco original de la forestación.
Cuidados culturales después de la plantación	
Protección	No es necesario
Riegos	No son necesarios
Reposición de marras	No es necesario
Escardas y binas	Gradeos
Manejo de la plantación	
Control de la competencia herbácea	Gradeos o manejo de cubiertas verdes
Conformación de la copa	Poda de formación, injerto y podas de fructificación
Fertilización	Sin fertilización

Puede ser recomendable incluir posibles usos agrosilvopastorales para mejorar el rendimiento agronómico de las explotaciones, que se sumarían a los beneficios que constituyen estas plantaciones en lo relativo al secuestro de C y a la mejora de la biodiversidad. Las plantaciones, además, contribuyen a la formación de suelo en terrenos de baja productividad, pudiendo ser utilizadas para la revalorización de éstos, ya que, aunque la edafogénesis es lenta, mejoran su estructura y, por lo tanto, su fertilidad.

Parcela demostrativa MP2: finca Los Lirios (Gaucín, Málaga)

Caracterización ambiental de la finca

La parcela demostrativa de mejora productiva de plantaciones de forestación con algarrobo está localizada en el término municipal de Gaucín (Málaga). Los Lirios es una finca agroforestal con aprovechamiento ganadero y de recolección de fruto de algarrobo, en la que el algarrobo se encuentra en las zonas más elevadas (Fig. 5.18). En el año 1999 se reforestó con algarrobo una superficie de 200 ha, mezclándose en algunas zonas con encina y alcornoque y en otra formando una masa pura (Fig 5.19 y 5.20).

Figura 5.18. Localización y perímetro de plantación con algarrobo en la finca Los Lirios (Gaucín, Málaga).

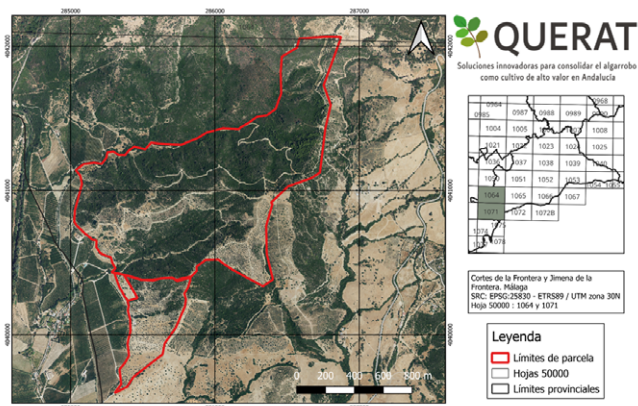


Figura 5.19. Forestación de tierras agrarias con algarrobo en la finca Los Lirios (QUERAT, 2024).



El terreno presenta una topografía escarpada con un rango de pendientes entre el 30-40 %. La zona se caracteriza por un fitoclima IV2 Mediterráneo genuino subtropical (Tabla 5.8), con precipitaciones medias anuales entre 800 mm y 1200 mm. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución de los lentiscales, coscojares, acebuchales, y encinares, sobre vertisoles crómicos y cambisoles vérticos con cambisoles cálcicos, regosoles calcáreos y vertisoles pélicos, que históricamente ha estado ocupada por un alcornocal ahuecado con cultivo de larga rotación. En la actualidad, el paisaje está dominado por cultivos agrícolas leñosos de regadío en las partes más bajas, con restos de manchas de porte arbustivo en las zonas más escarpadas junto con los restos de alcornocales degradados.

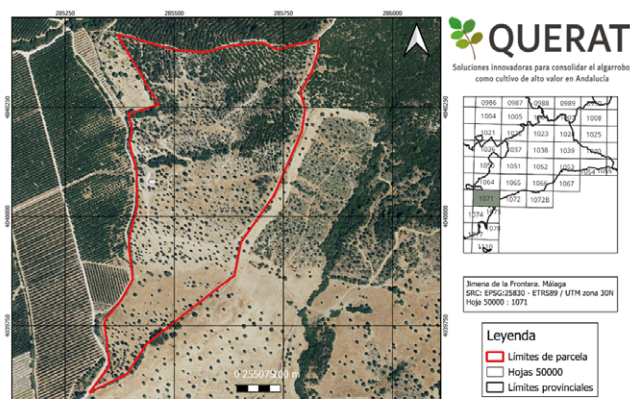
Tabla 5.8. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca Los Lirios (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
800-1200	> 6	28-32	17-19	800-900

Actuaciones

Se ha seleccionado una parte del sector sudoeste de la superficie que fue objeto de forestación en 1999 como área demostrativa para aplicar el modelo de maximización de

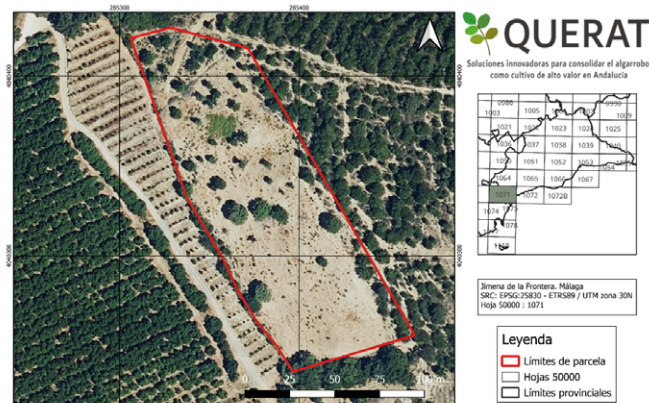
la producción (Fig. 5.20). Esta área consta de dos zonas diferenciadas: i) la zona más escarpada presenta una dehesa de acebuches, alcornoques y quejigos en muy baja densidad, en la que se efectuó un enriquecimiento de dehesa por iniciativa de la propiedad (que respondería al modelo MP1) y en la que se injertaron algunos pies en 1999 con variedades locales, y ii) la zona menos escarpada (zona nordeste en la Fig. 5.20), con una mayor intensidad de cultivo y de uso ganadero y que no presentaba arbolado en su momento, que se han transformado en una formación pura de algarrobo tras su plantación en el marco del programa de la PAC. En esta última zona, la plantación de algarrobo se realizó por curvas de nivel mediante un subsolado hasta una profundidad de 50 cm y aterrazado en las zonas más escarpadas. En todo el sector, el desbroce de la vegetación arbustiva y herbácea se llevó a cabo de forma simultánea a la preparación del suelo. En el momento del establecimiento, se realizó una preparación adicional del punto de plantación mediante ahoyado manual (30 x 30 x 30 cm). La plantación se hizo en otoño, con suelo en tempero, a un marco regular de 8 x 4 m con plantas de vivero de tipo “forestal” procedentes de semillas, con un tamaño inicial de 30-50 cm de altura. La plantación se realizó de forma manual en el hoyo de plantación, a unos 20 cm de profundidad efectiva.



- Riegos. La plantación no recibió riegos de establecimiento.
- Laboreos. Una vez al año, a comienzos de la primavera y durante los tres primeros años, se realizó un gradeo para eliminar la vegetación adventicia.
- Conformación y guiado. Se han realizado podas de formación de los pies a partir de los veinte años.
- Otros cuidados en la implantación. No se utilizaron hidrogeles ni acolchados (*mulch*). Tampoco se aplicaron enmiendas o fertilizaciones.
- Tareas de mantenimiento. Estas tareas se han limitado al mínimo. Se han efectuado fundamentalmente las dirigidas a proteger la plantación (ver parcela demostrativa MP1: finca Los Tamayos, Prado del Rey, Cádiz).

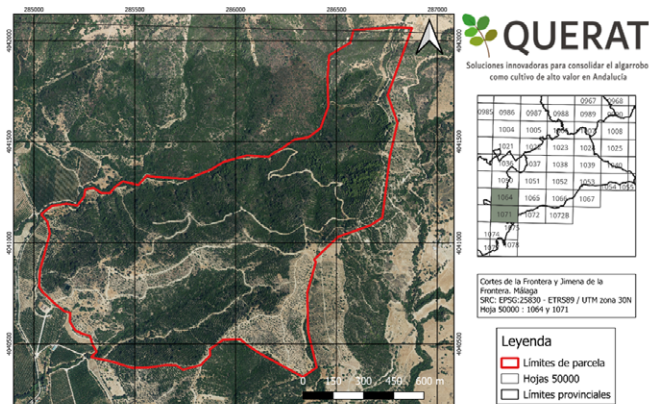
En el año 2023, para facilitar la obtención de material para injertar de manera masiva en la finca, se preparó una parcela de una hectárea para crear un campo de plantas madre injertadas con variedades locales (Fig. 5.22). Esta plantación se realizó con un marco regular de 2 x 4 m con una densidad de 1250 pies ha⁻¹ con planta de vivero con un porte de 100 cm de altura, producida a partir de semilla de la variedad Duraíó. Los individuos se injertaron con variedades comerciales. Esta parcela se mantiene de manera intensiva, con riegos periódicos tres veces por semana desde los meses de abril a octubre, con un volumen de 50 litros por planta y riego y con control del estrato herbáceo de forma mecanizada.

Figura 5.22. Límites de la zona de plantación intensiva de algarrobo para el establecimiento de un campo de plantas madre en la finca Los Lirios (Gaucín, Málaga).



Cabe indicar que en el resto de la finca con presencia de algarrobo, con mayor pendiente, esta especie forma parte de una dehesa antigua con una baja densidad de *Quercus* spp. (Fig. 5.23). Por la mayor dificultad de acceso y la reducida calidad de sitio, no ha sido posible aplicar el modelo MP2. En este caso, las labores de mantenimiento han sido puntuales; sólo con desbroces y podas de formación.

Figura 5.23. Límites de la zona de densificación de dehesa con algarrobo en la finca Los Lirios (Gaucín, Málaga).



Estado actual

La parcela demostrativa (Fig. 5. 20) está formada actualmente por individuos de algarrobo de 25 años sin injertar, con una densidad variable entre 200 y 300 pies ha⁻¹, dependiendo de la zona. Los árboles tienen una talla de entre 4,50 y 10 m de altura y 19 a 35 cm de diámetro normal. El porcentaje de machos es de, aproximadamente, un 50 %; si bien la propiedad tiene previsto injertarlos hasta reducir su porcentaje a menos del 10% (polinizadores) y favorecer la mecanización de la cosecha. En los próximos años, se procederá a efectuar estos injertos con materiales procedentes del campo de plantas madre establecido en la propia finca.

La plantación orientada al campo de plantas madre (Fig. 5.22) se puede asimilar en su diseño y gestión a una plantación tecnificada de algarrobo (MP4). En la actualidad la plantación tiene dos años, sin ninguna marra y un buen crecimiento (90% de los pies >2 m de altura), lo que ha permitido proceder a su injertado.

En términos de producción, sólo se realiza la cosecha de algarroba en la plantación monoespecífica (modelo MP2) y en la zona de densificación y enriquecimiento de dehesas, en la que ya existen árboles injertados con variedades locales (modelos MP1) (Fig. 5.20 en ambos casos). En la plantación monoespecífica, actualmente sólo produce fruto el 50 % de los pies, todos ellos procedentes de semillas, aunque, como se ha indicado, la propiedad tiene previsto seguir injertando individuos macho con variedades locales, actividad que se inició en 2023. Está previsto que esta plantación entre en producción en 4 o 5 años (2027-2028). Dado que se utilizan cultivares locales en los injertos, se espera una producción similar a los árboles adultos de la zona de densificación de dehesa (Tabla 5.9).



Figura 5.24. Detalle de frutos de los individuos injertados del área de enriquecimiento de dehesa (modelo MP1) (izq.) y de los pies de semilla de la plantación monoespecífica (modelo MP2) (drcha.).

Tabla 5.9. Características de fruto de la finca Los Lirios del verano de 2023: cosecha de los árboles de enriquecimiento de dehesa injertados y cosecha de los árboles de la plantación monoespecífica establecida en el marco del programa de forestación de tierras agrarias.

	Caracterización de los frutos	
	Árboles injertados	Plantación intensiva
Longitud de la vaina (cm)	19,3	9,3
Peso de la vaina (g)	16,5	6,69
Rendimiento en garrofín (%)	10,10	13,91
Peso de 100 semillas (g)	16,64	12,15

5.5.3. Modelo MP3. Plantaciones extensivas de nuevo establecimiento

Objetivo y descripción del modelo

El objetivo de estas plantaciones es establecer un cultivo del algarrobo de baja demanda de insumos (secano con bajos niveles de fertilización) a partir de la selección de cultivares de vigor alto y baja demanda hídrica, y con densidad baja (< 350 pies ha^{-1}). La recolección puede ser manual o mecanizada, con podas de formación en vaso (con sus diferentes modalidades). Este sistema comparte modelos agronómicos ampliamente usados en otros cultivos leñosos de frutos secos en secano, como el almendro o el pistacho, y se basa en aplicar niveles bajos de tecnificación.

Existen ya experiencias de este tipo de plantaciones en Andalucía (indirectamente a través del programa de forestación de tierras agrarias; modelo MP2, de mejora productiva de forestaciones de algarrobo). Se trata de un modelo similar a otros cultivos leñosos en secano, con baja intensificación del cultivo, aunque manteniendo algunos criterios agronómicos, como son la selección de los materiales de base (portainjerto selecto - planta injertada) y el riego de establecimiento, así como el manejo del arbolado (ratio hembra/macho) y las técnicas de poda que posibiliten la mejora de la producción.

Área potencial de implantación

Por sus características agronómicas, este modelo tiene su mayor potencial en las zonas con clima mediterráneo genuino con precipitaciones mayores a 450 mm, en la fachada meridional de Sierra Morena, el Valle del Guadalquivir, Sierras Gaditanas y Malagueñas y litoral de Granada (IV3 y IV4, y, en menor medida, IV2), con una temperatura media invernal en torno a 10 °C y una temperatura media estival no inferior a 20 °C durante, al menos, cuatro meses al año (Fig. 5.5). Se debe evitar establecer el algarrobo bajo este modelo en áreas con temperaturas inferiores a 0 °C (-4 °C) y con pluviometría anual inferior a 400 mm (Tous y Franquet, 2024). Estas plantaciones de algarrobo ocupan terrenos agrícolas de baja productividad con capacidad de mecanización, coincidiendo con la asociación de esta especie con otros cultivos leñosos en condiciones de baja rentabilidad (en particular, olivares), donde ya aparece de forma ocasional formando parte de una matriz agroforestal compleja.

Establecimiento

La densidad de algarrobo en plantaciones extensivas varía mucho según los autores (Spina, 1989; Tous y Franquet, 2024), aunque, por sus características ecológicas y productivas, parece recomendable que la densidad se adecue a las propias de otros cultivos leñosos en secano (100-200 árboles ha^{-1}). Se pueden considerar marcos de plantación de 6 x 8 m, 9 x 10 m e, incluso, 12 x 8 m configurando, en la medida de lo posible, formaciones regulares con una distribución óptima para su mecanización (Fig. 5.25).

En este tipo de plantaciones no es del todo necesario, aunque sí recomendable, un riego de producción en mayo (cultivos de secano). No obstante, es fundamental el riego en la fase de establecimiento de la plantación. Este tipo de plantaciones, por las zonas donde se establecen con climas benignos pero con un régimen hídrico limitado, y siempre que se hagan unos mínimos cuidados culturales, permiten una producción media a elevada (> 5000 kg ha^{-1}), aunque lejos de la producción de las

plantaciones tecnificadas (Modelo MP4 Plantaciones tecnificadas de producción de algarrobo). Por ello, se recomiendan como un cultivo complementario a otros con mayor riesgo de sufrir daños por sequía, (ej., olivo, almendro), lo que permite mejorar el rendimiento agronómico de las explotaciones. Estas plantaciones, al igual que en modelos anteriores, contribuyen a la formación de suelo en terrenos agrícolas de baja productividad.



Figura 5.25. Plantaciones extensivas de algarrobo con objetivo productor (QUERAT, 2024).

El método de establecimiento del algarrobo en explotaciones extensivas es la plantación, que se puede realizar de forma manual o mecanizada. Resulta fundamental la elección de la variedad para asegurar el éxito productivo. Las más recomendadas son “Matalafera”, “Melera”, “Rojal”, “Bugadera”, “Duraió”, “Ramillete” o “Sayalonga”; aunque se debe dar preferencia a cultivares con rendimiento en garrofín iguales o superiores al 15% (Tous y Franquet, 2024). Por ello, siempre que sea posible, se debe elegir material vegetal seleccionado y, preferiblemente, catalogado.

En plantaciones extensivas se debe plantar en otoño, en suelos con suficientes reservas hídricas, recomendándose que la planta esté en parada vegetativa. No es adecuado retrasar mucho la plantación por el efecto que pueden tener las altas temperaturas tempranas de primavera sobre el arraigo de la planta, que pueden comprometer su supervivencia y desarrollo, en particular en suelos con tendencia arcillosa. Es importante adecuar la calidad de planta de vivero al objetivo de la explotación para evitar fracasos en el establecimiento o costos innecesarios. Las características de los materiales de reproducción tipo de algarrobo para plantaciones extensivas es, preferiblemente, una planta de dos savias en contenedor de gran volumen ($> 1000 \text{ cm}^3$), en lo posible, injertada en vivero (Navarro Cerrillo et al., 2013) (ver Cap. 4).

En terrenos agrícolas con potencial productor, se puede utilizar el desbroce a hecho de forma mecanizada, mediante el paso de gradas. Esta práctica permite, además, una buena aireación del suelo. El procedimiento de preparación del suelo más recomendado en este tipo de plantaciones es el subsolado mediante un apero agrícola que profundice, al menos, 40 cm o, en algunos casos, el subsolado doble (cruzado o sobre la misma besana). Se puede aplicar una fertilización de fondo incorporando materia orgánica, fosforo y potasio.

En términos prácticos, en parte para compensar el estrés asociado al establecimiento, es muy frecuente el uso de tubos invernadero en las primeras etapas de la plantación, ya que, además de la protección física que aportan a la planta, mejoran sus expectativas de arraigo y su crecimiento en altura. En este sentido, se ha constatado que el tubo invernadero mejora la dominancia apical del algarrobo y favorece su supervivencia (Oliet et al., 2003). Una práctica complementaria en este tipo de plantaciones puede ser el uso de un *mulch* orgánico, al igual que los usados en otros cultivos leñosos. Es fundamental realizar las labores culturales análogas a las de otros cultivos leñosos de secano, como son el mantenimiento y la siega de las cubiertas verdes o el control de la competencia mediante labores.

Por último, una práctica ineludible en este tipo de plantaciones es la poda de formación y fructificación. El gran potencial de crecimiento del algarrobo posibilita una rápida entrada en producción, pero requiere una buena formación del árbol, adaptándolo a las necesidades de mecanización de la explotación. Debido a la fuerte dominancia apical, un despunte temprano a la altura de la cruz permite la elección de un sistema de ramas principales, típicamente con dos ejes principales (formación dicotómica) o tres (en vaso), sobre los que armar dos, tres o más pisos de ramas secundarias, configurando finalmente una copa de desarrollo libre sobre ellas. Un aspecto importante, ya mencionado, es la tendencia del algarrobo a fructificar sobre madera vieja; aspecto que debe tenerse en cuenta en las podas de fructificación. En los que respecta a la incidencia de plagas y enfermedades, se recomienda consultar lo desarrollado previamente en el modelo MP1. En la tabla 5.10 se resumen las principales actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones extensivas de algarrobo.

Tabla 5.10. Resumen de actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo extensivas.

Características generales	
Estación	Climas mediterráneos típico (IV2 y, en menor medida, IV3 y IV4), en zonas libres de heladas
Objetivo	Maximizar la producción
Características genéticas de la planta	Variedades o cultivares seleccionados
Planta tipo	2 savias en envases forestales (> 1000 cm ³) (> 50 cm de altura)
Procedimiento de preparación	
Fecha de plantación	Noviembre - marzo
Tratamiento previo de la vegetación	Gradas
Preparación del suelo	Subsolados
Diseño de la plantación	Marco regular (< 300 plantas ha ⁻¹).
Cuidados culturales después de la plantación	
Protección	Tubos invernadero perforados, <i>mulch</i> plásticos
Riegos	Riego de establecimiento
Reposición de marras	Primer año
Escardas y binas	Gradeos
Manejo de la plantación	
Control de la competencia herbácea	Gradeos o manejo de cubiertas verdes
Conformación de la copa	Podas de formación y de fructificación
Fertilización	Fertilización en el momento de la implantación del cultivo

Parcela demostrativa MP3: finca El Triguero (Carmona, Sevilla)

Caracterización ambiental de la finca

Esta parcela demostrativa se encuentra en el término municipal de Carmona (Sevilla, Fig. 5.26). La plantación se planteó sobre una antigua zona de cereal de secano de baja productividad dada la escasa profundidad efectiva del suelo (< 50 cm) y la pendiente del terreno (5-10 %). La zona se caracteriza por un fitoclima IV2 Mediterráneo (Tabla 5.11), con precipitaciones medias anuales de 400 mm a 600 mm. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución de los lentiscareales, coscojares, acebuchales y encinares, sobre cambisoles cálcicos, luvisoles cálcicos y luvisoles crómicos con litosoles y fluvisoles calcáreos poco profundos con afloramientos rocosos. En la actualidad el paisaje está dominado por cultivos de cereal de secano y cultivos leñosos de secano.

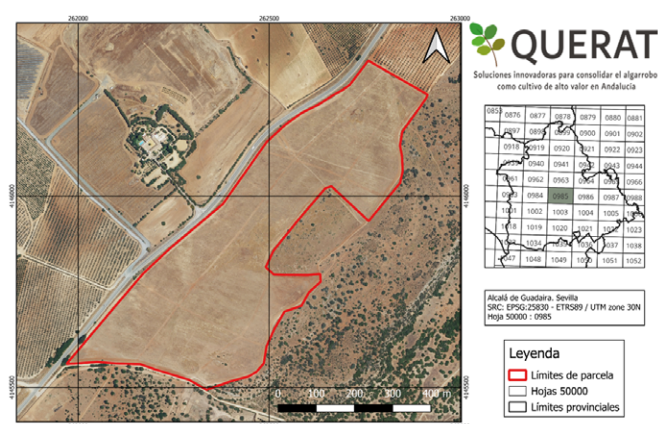


Figura 5.26. Localización y perímetro de la parcela en la finca El Triguero (Carmona, Sevilla).

Tabla 5.11. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca El Triguero (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
400-600	2-4	32-36	15-17	800-900

Actuaciones

La parcela se encuentra en proceso de transformación de cultivo de cereal de secano a plantación extensiva de algarrobo, establecida en el otoño de 2023. El terreno se preparó tras la última cosecha de cereal usando un arado de vertedera y una labor posterior de subsolado cruzado, con un marco de plantación de 4 x 8m y una densidad final de 312 árboles ha⁻¹ (Fig. 5.27). La superficie total preparada fue de 30 ha. Se efectuó un ahoyado manual de 30 x 30 cm en los cruces del subsolador y se plantaron plantas de 1 m, colocando un tutor y protector vertical. Los cuidados culturales fueron similares a la parcela de Gaucín.

- Protección. Se usaron tubos protectores perforados de 60 cm, riego de emergencia cada mes con cuba y tractor en poza alrededor del árbol, en una cantidad de 50 litros por planta y riego.
- Desbroce. Las calles se mantienen sin hierba mediante arado mecánico con tractor.

- Conformación y guiado. Hasta el momento de injertar se favorecerá la dominancia apical del árbol mediante podas de los brotes laterales del fuste. Una vez injertados, se les dejará la cruz a una altura de, aproximadamente, un metro y se efectuará una poda dicotómica con la primera cruz en dirección de la línea, formando así una copa óptima para la producción. Se colocaron tutores de 1m. Los árboles se van atando a ellos conforme aumenta su talla.
- Injerto. Se prevé injertar los árboles en el otoño de 2024, dejando un 10% de machos para la polinización de la plantación, ubicados éstos al tresbolillo entre líneas.
- Tareas de mantenimiento. Al tratarse de una plantación intensiva, la finca tiene un mantenimiento mayor que otros modelos, llevando a cabo siembras de cebada en las calles como cultivo ecológico con abonado de estiércol. El resto de los cuidados son los generales para las plantaciones (protección contra incendios, vigilancia sanitaria, eliminación de pies muertos y podas).



Figura 5.27. Plantación de algarrobo en áreas degradadas en la finca El Triguero (QUERAT, 2024).

Estado actual

En la actualidad la plantación se encuentra en desarrollo para el injertado con variedades comerciales de los individuos plantados.

5.5.4. Modelo MP4. Plantaciones tecnificadas de algarrobo

Objetivo y descripción del modelo

El objetivo de estas plantaciones es intensificar el cultivo del algarrobo a partir de la selección de variedades de rápido crecimiento y de alta producción, con marcos de plantación de densidad óptimas (~ 200 pies ha^{-1} , 6 x 8 m) que permitan la recolección mecanizada mediante el uso de mantos y *buggies*. Este sistema comparte modelos agronómicos intensivos basados en la incorporación de numerosos insumos ampliamente usados para otros frutos leñosos, como el olivo, el almendro o el pistacho. Se fundamenta en la tecnificación del cultivo del algarrobo para su mecanización. Aunque existen pocas experiencias de este tipo en Andalucía, se trata de un modelo que intensifica el cultivo a través del uso de planta injertada de alta calidad funcional (Fig.5.28), del riego, la fertilización y del manejo del arbolado (óptimo ratio hembra/macho), asumiendo técnicas de poda que posibiliten la mejora de la producción. Se trata de reducir el período improductivo, optimizar el uso de recursos, incluida la mano de obra, y, al mismo tiempo, reducir el coste total de la explotación.

Área potencial de implantación

Por sus características agronómicas, este modelo tiene su mayor potencial en las zonas con clima mediterráneo genuino, con precipitaciones mayores a 400-450 mm, como son la Costa y Andevalo onubense, el Valle del Guadalquivir, las áreas de contacto de las campiñas con las Sierras Gaditanas y algunas zonas de Málaga. Puede ocupar terrenos agrícolas de baja productividad, como el olivar marginal, siempre que presenten una buena capacidad para su mecanización y riego. Se trata de terrenos con un clima mediterráneo genuino, cálido o moderadamente cálido, menos seco, con inviernos cálidos o tibios (IV2, lentiscales, coscojares, y acebuchales, con temperatura media invernal superior a 10 °C, una temperatura media estival no inferior a 20 °C durante, al menos, cuatro meses al año y con un régimen térmico moderado (ver Fig. 5.5).

Establecimiento

La densidad de algarrobo en plantaciones tecnificadas varía mucho según los autores (Spina, 1989; Tous y Franquet, 2024), aunque, como se indicó previamente, sería similar a la de otros cultivos leñosos mediterráneos para optimizar la mecanización (6 x 8 m; aunque se han ensayado plantaciones de 9 x 4,5 m). Las densidades máximas recomendadas serían de ~200 pies ha⁻¹, con los pies distribuidos a marco real, sobre terrenos bien cultivados (Fig. 5.29). Se considera necesario el aporte de agua en régimen de riego deficitario (< 1500 m³ ha⁻¹) y la fertilización (ej., nitrato amónico o nitrato sulfato amónico). En este tipo de plantaciones es fundamental el diseño de los polinizadores, recomendándose que no bajen de un 12% del número total de pies (ratio hembra: macho de 1:8) o, incluso, ratios mayores si se usan variedades hermafroditas autofértiles (1:3, 25 %, Tous y Franquet, 2024). Las plantaciones tecnificadas de algarrobo, por las zonas donde se realizan (climas más benignos y con un régimen hídrico más favorable), se efectúan los cuidados culturales adecuados que permiten un importante incremento de la producción (> 8000 kg ha⁻¹).



Figura 5.28. Ejemplo de árbol injertado en plantación de algarrobo con objetivo productor (QUERAT, 2024).



Figura 5.29. Plantación tecnificada de algarrobo con objetivo productor. Rastrojo de cultivo de cebada entre plantación lineal de algarrobo (QUERAT, 2024).

Se trata, por tanto, de una alternativa muy interesante como complemento a otros cultivos leñosos, en particular el olivar. Al igual que en otros tipos de plantación descritos, sería deseable valorizar la capacidad de secuestro de C y la mejora de la biodiversidad, así como la mejora de la productividad de los suelos.

En plantaciones tecnificadas, dada las posibilidades de aplicar cuidados culturales, el periodo de plantación se puede ampliar hasta mediados de primavera, aunque siempre se recomienda, si las condiciones del vivero lo permiten, que la planta esté en parada vegetativa. No obstante, no se recomienda retrasar mucho la plantación más allá de marzo, por el efecto que las altas temperaturas tempranas puedan tener sobre el arraigo de la planta; esta situación que puede comprometer su supervivencia, en particular en suelos con tendencia arcillosa. Al igual que en las plantaciones extensivas, debe elegirse muy bien el material vegetal, preferiblemente seleccionado por sus características superiores, y, si es posible, catalogado, con orientación a la producción de garrofín ($\geq 15\%$) y la resistencia a plagas y enfermedades, dado que la alta densidad de plantación puede aumentar los riesgos de afección. La planta tipo de algarrobo para plantaciones tecnificadas debe ser, preferiblemente, de dos savias, en contenedor de gran volumen ($>1000 \text{ cm}^3$) e injertada en vivero (Navarro Cerrillo et al., 2013) (ver Cap. 4).

En terrenos agrícolas con potencial productor se debe preparar bien el terreno utilizando el desbroce a hecho de forma mecanizada mediante el paso de gradas, que permite, además, una buena aireación del suelo. El procedimiento de preparación más recomendado es el subsolado mediante un apero agrícola que profundice, al menos, 40 cm o, en algunos casos, el subsolado doble (cruzado o sobre la misma besana) (Fig. 5.30).

Al igual que en el modelo de plantación extensiva y para compensar, en parte, el estrés asociado al establecimiento, debe hacerse uso de tubos invernadero en las primeras etapas de desarrollo. Los tubos, además de la protección física que aportan a la planta, mejoran sus expectativas de arraigo y el crecimiento en altura, tal

y como se ha indicado previamente (Oliet et al., 2003). Una práctica complementaria en este tipo de plantaciones puede ser el uso de un *mulch* orgánico, como los usados en otros cultivos leñosos. Este tipo de plantaciones tecnificadas conlleva, además, un conjunto de cuidados culturales, como la instalación del sistema de riego o de fertirrigación de forma simultánea a la preparación del suelo, así como las labores propias de otros cultivos leñosos similares, como el mantenimiento de cubiertas verdes o el control de la competencia mediante labores.

Por último, un aspecto fundamental de este tipo de plantaciones es la práctica de podas de formación y de fructificación (ver modelo MP3). El rápido crecimiento del algarrobo posibilita una rápida entrada en producción, por lo que es necesario gestionar adecuadamente la formación del árbol, adaptándolo a las necesidades de mecanización de la explotación. Debido a la fuerte dominancia apical, un despunte temprano a la altura de la cruz permite la elección de un sistema de ramas principales, típicamente con dos ejes dominantes (formación dicotómica) o tres (en vaso), sobre los que armar dos, tres o más pisos



Figura 5.30. Plantación tecnificada de algarrobo en la finca Los Lirios (QUERAT, 2024).

de ramas secundarias, configurando finalmente una copa de desarrollo libre sobre ellas. Al igual que en casos anteriores, hay que prever la fructificación del algarrobo sobre madera vieja, por lo que hay que mantener la cosecha en el interior de la copa, cerca de los pisos secundarios. En lo que respecta a la incidencia de plagas y enfermedades, se recomienda consultar lo desarrollado previamente en el modelo MP1. En la tabla 5.12 se resumen las principales actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo.

Tabla 5.12. Resumen de actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones tecnificadas de algarrobo.

Características generales	
Estación	Climas mediterráneos típico (IV2 y, en menor medida, IV3 y IV4), en zonas libres de heladas
Objetivo	Maximizar la producción
Características genéticas de la planta	Variedades o cultivares seleccionados
Planta tipo	2 savias en envases forestales (> 1000 cm ³) (> 50 cm de altura) injertada en vivero
Procedimiento de preparación	
Fecha de plantación	Noviembre - marzo, en función del riesgo de heladas
Tratamiento previo de la vegetación	Gradas
Preparación del suelo	Subsolado doble
Diseño de la plantación	Marco regular (~200 plantas ha ⁻¹).
Cuidados culturales después de la plantación	
Protección	Tubos invernadero perforados, <i>mulch</i> plásticos
Riegos	Riego de establecimiento y de producción (<1500 m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Reposición de marras	Primer año
Escardas y binas	Gradeos, siegas
Manejo de la plantación	
Control de la competencia herbácea	Gradeos o manejo de cubiertas verdes
Conformación de la copa	Podas de formación y de fructificación
Fertilización	Fertilización o fertirrigación

Parcela demostrativa MP4: finca Buenavista (Posadas, Córdoba)

Caracterización ambiental de finca

La parcela demostrativa de plantación tecnificada de algarrobo para la producción intensiva se encuentra en la finca Buenavista en el término municipal de Posadas (Córdoba) (Fig. 5.31). La plantación se está realizando por fases sobre una zona de cultivo de cereal con pendientes suaves 5–10%. La zona se caracteriza por un fitoclima IV2 Mediterráneo (Tabla 5.13), con precipitaciones medias anuales entre 600 mm y 800 mm. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución de los lentiscales, coscojares, acebuchales, y encinares, sobre luvisoles crómicos, litosoles y regosoles éutricos con nitosoles dístricos, profundos con una capa de depósito calcáreo a los 60 cm. En la actualidad el paisaje está dominado por zonas de monte al norte de la plantación y por cultivos herbáceos y leñosos en el resto de las lindes.

Figura 5.31. Localización y perímetro de la parcela demostrativa en la finca Buenavista (Posadas, Córdoba).

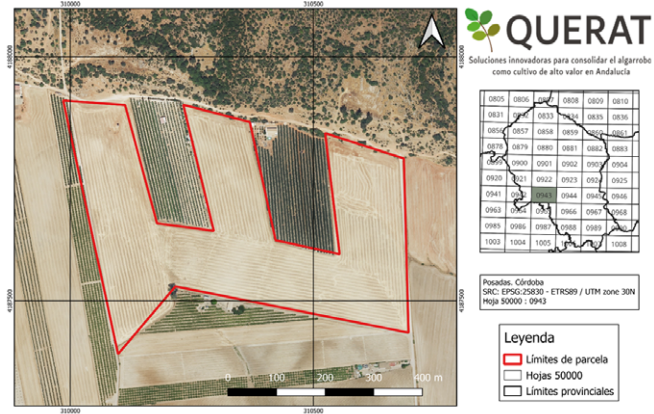


Tabla 5.13. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca Buenavista (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
600-800	2-4	> 36	15-17	800-900

Actuaciones

La finca se encuentra en proceso de transformación del cultivo de cereal de secano a plantación tecnificada de algarrobo (Fig. 5.32). La finca está dividida en cuatro parcelas; la primera se plantó en el otoño de 2022, la segunda en el otoño de 2023 quedando por ejecutar las dos últimas fases de la plantación.

El terreno se preparó tras la cosecha de cereal del año anterior con un arado de vertedera y un ahoyado posterior con retroexcavadora, preparando un hoyo de 1 x 1 x 1 m. El marco de plantación elegido fue 10 x 6 m con una densidad final de 166 árboles ha⁻¹. La tierra de rellenado de los hoyos se mezcló al 50% con estiércol curado de vaca. La primera plantación se realizó en otoño, usando planta de 1 m de altura cultivada en la finca



Figura 5.32. Plantación intensiva de algarrobo en la finca Buenavista (QUERAT, 2024).

y sin injertar. En la segunda fase se utilizó planta con mayor talla (1-1,30 m), e injertada con variedades “Sayalonga”, “Alexia”, “P14” y “P17”. Se ha colocado un 10% de las dos variedades hermafroditas (“Alexia”, “P14”) para favorecer la polinización.

Los cuidados culturales durante la plantación fueron similares a los de otras plantaciones (ver MP2 y MP3), requiriéndose, asimismo, trabajos de mantenimiento:

- Protección. No se utilizaron tubos protectores.
- Riegos. Durante los dos primeros veranos se han aplicado riegos cada 15 días con cuba y tractor (100 litros por planta) en alcorque.
- Laboreos. Las calles se siembran con cebada para ensilado para ganado hasta que las plantas superen el diente del ganado, momento en el cual se hará pastoreo con bovino.
- Conformación y guiado. Una vez injertados, se dejará la cruz en torno a un metro de altura y se practicará una poda dicotómica con la primera cruz en dirección de la línea, formando así una copa óptima para la producción. Se colocaron tutores de 1 m; se van atando los árboles a ellos conforme aumenta su talla.
- Injerto. La primera fase se injertó en parche en la primavera de 2023; y se reinjertó eliminando marras en la primavera de 2024. La estructura de variedades se respetó para todas las fases. En la segunda fase, como se ha indicado, las plantas vienen injertadas de vivero.
- Tareas de mantenimiento. Al tratarse de una plantación intensiva, la finca tiene un mantenimiento mayor que otros modelos, como son el riego, las podas y el mantenimiento del suelo mediante siembras de cebada en las calles como cultivo ecológico con abonado de estiércol. El resto de los cuidados son los generales para las plantaciones (protección contra incendios, vigilancia sanitaria, eliminado pies muertos y podas).

Estado actual

En la actualidad, la primera fase de la plantación se encuentra ya injertada y en su último año de riego estival. La segunda fase con planta injertada en vivero se encuentra en su primer año tras la plantación. Lógicamente, no se ha podido estimar aún la producción de algarroba en esta parcela. Se prevé su entrada en producción en unos 3-4 años.

5.6. Modelos de restauración

5.6.1. Modelo MR1. Recuperación de áreas degradadas

Objetivo y descripción del modelo

El objetivo de estas plantaciones es contribuir, junto con otras especies típicamente forestales, como *Pinus halepensis*, *P. pinea*, *Quercus ilex*, *Olea europaea* o *Pistacia lentiscus*, a la restauración de ecosistemas forestales en clima mediterráneo para la protección de suelo y la lucha contra la desertificación. En este tipo de plantaciones, el algarrobo se utiliza como especie de vocación forestal, cultivada en vivero a partir de semilla de procedencia conocida, con marcos de plantación diversos (< 350 pies ha⁻¹). En conjunto, estas formaciones mixtas contribuyen al control de los procesos erosivos y al incremento de nichos ecológicos promoviendo mayor diversidad de flora y fauna.

Así, en este modelo resulta conveniente una alta diversidad genética de los materiales de reproducción y aplicar diseños “restauradores” y con escasos cuidados culturales. El algarrobo se ha usado con frecuencia como especie para la plantación forestal en Andalucía, principalmente en forestación de tierras agrarias (ver Modelo MP2 Mejora productiva de forestación de algarrobo en tierras agrarias), por lo que se cuenta con una dilatada experiencia restauradora en distintas condiciones ecológicas.

Área potencial de implantación

Las áreas de mayor potencial para el establecimiento de repoblaciones de algarrobo con objetivo restaurador se corresponden con las provincias de Granada, Málaga, Cádiz y Córdoba (Ruiz de la Torre, 2006). El área de distribución óptima para este modelo coincide con la asociación de esta especie con otras propias de climas mediterráneos secos con presencia del acebuche, el palmito, la encina, el labiérnago, el mirto, la cornicabra o el lentisco y, con menor frecuencia, el alcornoque. En estas condiciones, el algarrobo representa una alternativa restauradora en áreas con clima mediterráneo típico (IV2 y, en menor medida, IV3 y IV4), con una temperatura media invernal en torno a 10 °C, una temperatura media estival no inferior a 20 °C durante, al menos, cuatro meses al año y con un régimen térmico moderado (Ruiz de la Torre, 2006) (ver Fig. 5.5). Se debe evitar establecer este modelo en zonas con temperaturas inferiores a los 0 °C (-4 °C). Las zonas de mejor potencial restaurador de la especie se encuentran en localizaciones con lluvias de otoño e invierno y una pluviometría anual de 250-300 mm (Batlle y Tous, 1997; Ruiz de la Torre, 2006), siendo recomendable su establecimiento en zonas con precipitaciones hasta 400-450 mm. En Andalucía, estas áreas se corresponden con la fachada meridional de Sierra Morena, el Valle del Guadalquivir, las Sierras Gaditanas y Malagueñas y el litoral de Granada. Dado el alto porcentaje de marras observado en algunos casos, la experiencia de la forestación de tierras agrarias puede servir para identificar mejor las áreas prioritarias. Así, la supervivencia obtenida ha sido muy variable, entre un 18 y un 30 % en Guadiamar (Navarro Cerrillo et al., 2001), entre un 0 y un 65 % en Córdoba (Navarro Cerrillo et al., 2001) y entre un 40 y un 60 % en Almería (Planelles et al., 2001).

Las plantaciones de algarrobo con objetivo restaurador presentan una gran resistencia a la sequía dada la gran rusticidad de la especie. En condiciones adecuadas crece con rapidez, por lo que se recomienda como planta forestal para mejorar extensas zonas de terreno accidentado, sin considerar el aspecto productivo, si no sólo la protección del suelo. Al respecto, el algarrobo puede contribuir a la formación de suelo en terrenos rocosos y desnudos y utilizarse para la revalorización de estos terrenos ya que, aunque la edafogénesis es lenta, contribuye a mejorar su estructura y, por lo tanto, su capacidad de infiltración. La abundante producción de frutos a lo largo de prácticamente todo el año hace de esta especie un elemento importante en ambientes muy degradados, donde contribuye a la alimentación de la fauna doméstica y silvestre (Fig. 5.33).

Establecimiento

Los diseños de plantación propuestos tradicionalmente para esta especie tienen una clara vocación agronómica (Tous y Batlle, 1990, Tous y Franquet, 2024), aunque por sus características ecológicas es una especie que se adapta perfectamente a su uso forestal. En este último caso, aparece como una especie complementaria en repoblaciones genéricas con objetivo protector con baja densidad (<100 pies ha⁻¹), siempre ocupando los sitios que el diseño repoblador considere óptimos (pequeños “bosquetes”, redes de drenaje, antiguas terrazas de cultivo, etc.) (Pemán

et al., 2021), orientados a la plantación a los microhábitats con mayor disponibilidad hídrica y con mayor profundidad de suelo. La estructura creada consigue proporcionar una matriz de vegetación más compleja y, al ser moderada la competencia, las plantas se mantienen con un elevado vigor vegetativo y una buena ramificación (Fig. 5.34, Fig. 5.35).

El método de repoblación recomendado para el algarrobo en trabajos de restauración de sistemas forestales es la plantación manual. En el caso de plantaciones de protección se debe elegir un material forestal diverso genéticamente. Resulta fundamental, también, la elección de la procedencia de la semilla para asegurar el éxito de la plantación. En plantaciones en el medio natural, donde las posibilidades de cuidados culturales son muy limitadas, la plantación debe hacerse en otoño y evitar retrasos que pueden comprometer la supervivencia de las plantaciones, en particular en suelos muy pedregosos o de escasa profundidad efectiva. Las características de la planta tipo de algarrobo para labores de restauración puede ser planta de una savia en contenedor forestal (> 200 cm³ repoblaciones genéricas) (Navarro Cerrillo et al., 2013). Es importante adecuar la calidad de planta de vivero al objetivo de la plantación para evitar fracasos en el establecimiento o costos innecesarios.



Figura 5.33. Algarrobos injertados con buen vigor sobre suelos rocosos de poca profundidad en los límites de una cantera en la costa de Málaga (QUERAT, 2024).



Figura 5.34. Renaturalización de un área con algarrobo en la Cruz del Puerto (Benaocaz, Cádiz) (QUERAT, 2024).



Figura 5.35. Plantación de algarrobo con objetivo restaurador en los márgenes de una cárcava (QUERAT, 2024).

Una práctica sencilla en repoblaciones de algarrobo es el uso de *mulchs* de piedra, práctica tradicional en el campo forestal en ambientes áridos y semiáridos, en particular en algunas repoblaciones en el Levante peninsular. En repoblaciones protectoras no suelen hacerse labores para el control de la competencia, ni aplicarse fertilizantes, ni podas de formación. En lo que respecta a la incidencia de plagas y

enfermedades, se recomienda consultar lo desarrollado previamente en el modelo MP1. En la tabla 5.14 se resumen las principales actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo.

Tabla 5.14. Resumen de actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo con objetivo protector.

Características generales	
Estación	Climas mediterráneos típico (IV2 y, en menor medida, IV3 y IV4), en zonas libres de heladas
Objetivo	Restauración en zonas mediterráneas
Características genéticas de la planta	Procedencia preferiblemente local de acuerdo con las siguientes regiones de identificación y utilización: Litoral suroriental andaluz (38), Subbética granadina (40), Orla meridional de la depresión del Guadalquivir (41), Serranía de Ronda (42), Litoral meridional andaluz (43), Depresión del Guadalquivir (44) y Sierra Morena meridional (45)
Planta tipo	1 savia en envases forestales (200-300 cm ³) (8-10 cm de altura)
Procedimiento de preparación	
Fecha de plantación	Noviembre - marzo
Tratamiento previo de la vegetación	Desbrozadoras o motodesbrozadoras
Preparación del suelo	Ahoyado con retroexcavadora
Diseño de la plantación	Enriquecimiento o densificación (< 200 plantas ha ⁻¹)
Cuidados culturales después de la plantación	
Protección	Tubos invernadero perforados. Mallas de sombra
Riegos	Sin riego
Reposición de marras	Primer año
Escardas y binas	Escardas manuales
Manejo de la plantación	
Control de la competencia herbácea	Sin control de la competencia
Conformación de la copa	Sin podas
Fertilización	Sin fertilización

Parcela demostrativa MR1: finca Las Labores (Albox, Almería)

Caracterización ambiental de la finca

La parcela demostrativa de restauración se encuentra en la finca Las Labores en el término municipal de Albox (Almería) (Fig. 5.36). Se trata de una antigua plantación de olivos y almendros cuya producción ha ido decreciendo con el tiempo y con problemas de mortalidad del arbolado derivados de la baja pluviometría y la escasa fertilidad de los suelos. La zona se caracteriza por un fitoclima IV1 Mediterráneo (Tabla 5.15), con precipitaciones medias anuales entre 200 mm y 400 mm. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución de los lentiscales, sobre cambisoles cálcicos, luvisoles cálcicos y litosoles calcáreos de escasa profundidad efectiva dada la presencia de afloramientos rocosos. En la actualidad el paisaje está dominado por zonas de cultivos leñosos de secano.

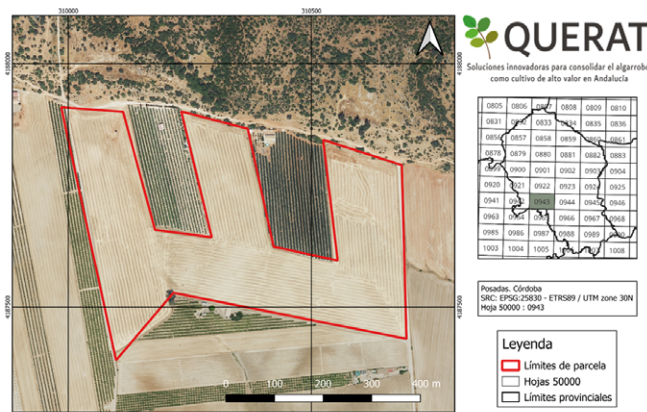


Figura 5.36. Localización y perímetro de la parcela en la finca Las Labores (Albox, Almería).

Tabla 5.15. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca Las Labores (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
200-400	2-4	32-36	17-19	900-1000

Actuaciones

Esta finca está en proceso de transformación de un cultivo de almendro y olivo de secano con riego deficitario a un modelo restaurador de algarrobo. En el año 2010 se hizo una plantación de algarrobo a un marco de 6 x 6 m en las áreas con presencia de almendros muertos (Fig. 5.37). Actualmente la propiedad se plantea seguir con este modelo para transformar la finca a algarrobo en los próximos años, dado que ha mostrado una mejor aptitud en estos terrenos agotados para la agricultura y con una pluviometría mínima.

La plantación se realizó manualmente con ahoyado, también manual, en hoyos de 40 x 40 x 40 cm, aunque cabe indicar que es posible utilizar la mecanización (barrena helicoidal). Se utilizaron plantas de vivero de 1 m.

Los cuidados culturales en la implantación y de mantenimiento posterior son los mínimos:

- Protección. Se colocaron tubos protectores perforados de 60 cm.
- Riegos. Riego deficitario por goteo en los meses de verano, de mayo a septiembre, con un volumen total de agua por planta de 400 litros.
- Laboreos. Las calles se mantienen sin vegetación herbácea mediante arado mecánico con tractor cada tres años.
- Conformación y guiado. Hasta el momento se ha favorecido la dominancia apical del árbol mediante podas de los brotes laterales del fuste. Una vez realizado el injerto de los pies, se deja la cruz entorno al metro y realizar podas formación tradicional para favorecer la cosecha mediante vareo. Se colocaron tutores de 1 m; los árboles se van atando a ellos conforme aumenta su talla.
- Injerto. Los árboles se han injertado en el otoño de 2024 con cultivares hermafroditas locales, que ya han mostrado su viabilidad en la zona.
- Tareas de mantenimiento. El resto de las actuaciones de mantenimiento son similares a otros tipos de plantaciones.



Figura 5.37. Plantación de algarrobo en áreas degradadas en la finca Las Labores (Albox) (QUERAT, 2024).

Estado actual

La plantación ha demostrado la viabilidad del algarrobo como especie de sustitución del olivo y del almendro en condiciones de marginalidad para estos cultivos leñosos, produciéndose un bajo porcentaje de marras. Los árboles se encuentran en buen estado, con portes de entre 3 y 5 m de altura y un diámetro normal que oscila entre 10 y 25 cm. El injerto sobre los patrones procedentes de semilla ha funcionado bien. Cuatro años después del injertado, los árboles han entrado en producción, aunque presentan cierta vecería, con un año de alta producción seguido de uno o dos de producción media o baja (Tabla 5.16, Fig. 5.38).



Figura 5.38. Detalle de frutos de los individuos adultos presentes en la finca.

Tabla 5.16. Características de los frutos de la finca Las Labores en la cosecha del verano de 2023.

Caracterización de los frutos	
Longitud de la vaina (cm)	12,40
Peso de la vaina (g)	13,56
Rendimiento en garrofín (%)	16,39
Peso de 100 semillas (g)	17,73

Parcela demostrativa MR1: finca El Rano (Ubrique, Cádiz)

Caracterización ambiental de la finca

La finca se encuentra localizada en el término municipal de Ubrique (Cádiz) (Fig. 5.39). Se trata de una antigua finca ganadera con zonas de mucha pendiente (20-30 %) y pequeñas zonas llanas (10-20 %). Desde hace generaciones, se ha aprovechado, recolectado y cuidado la plantación de algarrobo, casi pura, que la conforma. La zona se caracteriza por un fitoclima IV2 Mediterráneo (Tabla 5.17), con precipitaciones desde 800 mm a 1200 mm medios anuales. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución de los lentiscas, coscojares, acebuchales y encinares. La finca se encuentra sobre litosoles, luvisoles crómicos y rendsinas con cambisoles cálcicos en un suelo con mayor profundidad en las partes bajas y casi inexistente en la zona de herriza. En la actualidad el paisaje está dominado por zonas adehesadas con aprovechamiento ganadero y una plantación principal de acebuches y algarrobos con algún cultivo familiar.

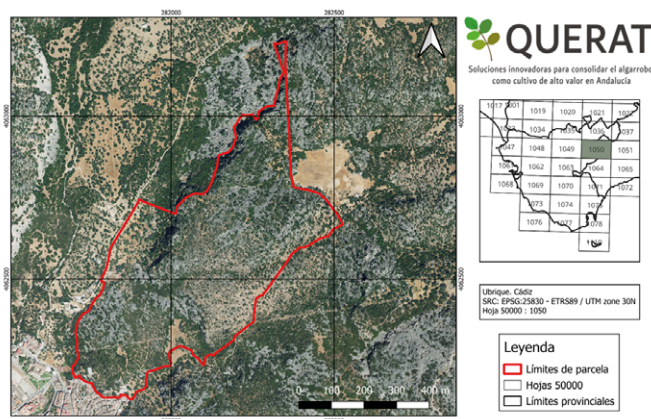


Figura 5.39. Localización y perímetro de la finca plantación de algarrobo en la finca El Rano (Ubrique, Cádiz).

Tabla 5.17. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca El Rano (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
1200-1600	4-6	32-36	17-19	900-1000

Actuaciones

El estado actual de esta finca es fruto del aprovechamiento de la población natural de algarrobo que se ha ido injertando y limpiando en las zonas más accesibles, dejándola en condiciones seminaturales en las zonas de herriza. El manejo de la población de algarrobo se ha compatibilizado tradicionalmente con ganadería extensiva, usando el ramón de la vegetación acompañante. Los algarrobos de mayor potencial productor se han injertado con cultivares tradicionales de la zona, lo que ha permitido integrar la cosecha de algarroba como una actividad más de la finca (Fig. 5.40).



Figura 5.40. Población irregular de algarrobos adultos en producción en la finca El Rano: zona de mayor facilidad de cultivo con mezcla de almendros y olivos (izq.); zona con dificultad para el cultivo con plantación en la que domina el algarrobo adulto (dcha.) (QUERAT, 2024).

Estado actual

En la actualidad la población de algarrobo conforma una dehesa con árboles adultos, distribuidos de forma irregular, con individuos, algunos centenarios, injertados. Se prevé injertar los individuos más jóvenes, procedentes de la dispersión natural de las semillas. El porte de los ejemplares de algarrobo oscila entre 0,5 y 18 m de altura y su diámetro desde 3 cm a 1,5 m en la base. La producción es bastante estable, con algún año vecero, y con una carga que oscila entre 50 y 300 kg por árbol (Tabla 5.18, Fig. 5.41).



Figura 5.41. Detalle de frutos de variedades tradicionales presentes en la finca.

Tabla 5.18. Características de los frutos de la finca El Rano en la cosecha del verano de 2023.

Caracterización de los frutos		
	Injertada	Natural
Longitud de la vaina (cm)	15,6	9,8
Peso de la vaina (g)	7,74	6,56
Rendimiento en garrofin (%)	14,68	23,95
Peso de 100 semillas (g)	18,09	11,22

5.6.2. Modelo MR2. Plantaciones de algarrobo para actuaciones de oasificación

Objetivos y descripción del modelo

El algarrobo, por sus características ecológicas, tiene un alto potencial restaurador ecohidrológico en las zonas con clima mediterráneo árido y semiárido con

precipitaciones por debajo de 300 mm, e incluso inferiores, como en la fachada costera oriental de Andalucía (Almería y Granada). El establecimiento en estas condiciones es complejo y debe asociarse a actuaciones de “recolección de agua” (oasificación) (Martínez de Azagra, 1996). Se trata de efectuar plantaciones orientadas a la recolección de agua de escorrentía en los puntos de plantación mediante la creación de microembalses convenientemente dimensionados, que pueden ser contruidos con diferentes materiales, como mampostería en seco, gaviones o tierra (Fig. 5.42, Fig. 5.43). Estas construcciones capturan e infiltran el agua de escorrentía (sistematización primaria), mejoran la humedad del suelo y favorecen el crecimiento de la vegetación forestal, revirtiendo así el proceso de desertificación causado por la aridez del suelo. Además de recolectar agua, la oasificación permite la captura de nutrientes y suelo, lo que contribuye, a su vez, al control de la erosión hídrica, común en áreas áridas y semiáridas (Manso y Martínez de Azagra, 2007).

En este caso, el algarrobo aparece asociado a especies como pino carrasco (*Pinus halepensis*), acebuche (*Olea europaea*) o higueras (*Ficus carica*). En conjunto, estas plantaciones contribuyen al control de los procesos torrenciales a escala de microcuenca, diversifican el paisaje y contribuyen a aumentar la biodiversidad.



Figura 5.42. Plantación de oasificación de algarrobo en zonas áridas de Israel (Ashkenazi et al., 2020).

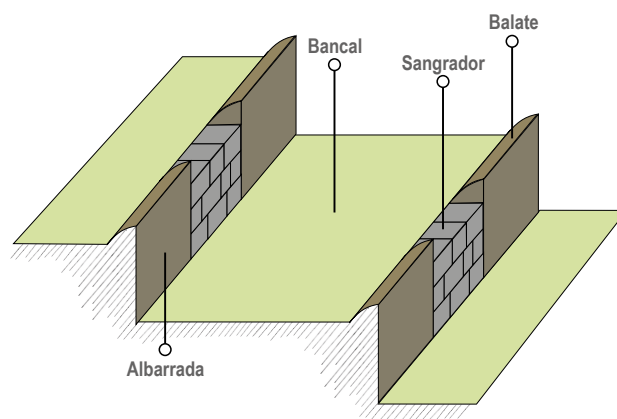


Figura 5.43. Diseño de estructura hidrológica para trabajos de oasificación de algarrobo (a partir de Morales, 1969).

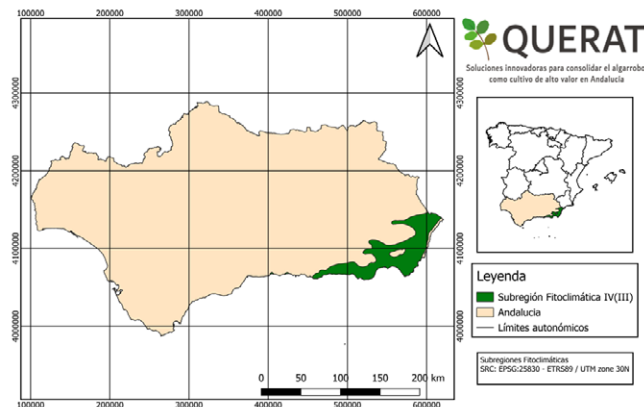
Área potencial de implantación

Las áreas de mayor potencial para el establecimiento de plantaciones de algarrobo con objetivo de oasificación se corresponden con las provincias de Almería y, ocasionalmente, Granada y Málaga. El área de distribución óptima para este modelo coincide con la asociación de esta especie con otras más propias de climas mediterráneos áridos y semiáridos con presencia del acebuche y del palmito, y donde aparece junto al pino carrasco y al lentisco o con un cortejo de matorrales xerófilos.

En estas condiciones el algarrobo habita en clima submediterráneo árido (III(IV), (espinales de azufaifo, cornicales) y, en menor medida, en los mediterráneos subáridos, cálidos y de estíos muy secos (IV(III) (lentiscars, coscojares, acebuchales) (Fig. 5.44), con una temperatura media invernal superior a 10 °C, una temperatura media estival no inferior a 20 °C durante, al menos, cuatro meses al año y con un régimen térmico moderado. Las zonas de mejor potencial de establecimiento de

actuaciones de oasisificación se encuentran en localizaciones con una pluviometría anual inferior a 300 mm (Ruiz de la Torre, 2006, Fig. 5.44).

Figura 5.44. Subregiones fitoclimáticas (Allué Andrade, 1990) óptimas para plantaciones de algarrobo con objetivo de oasisificación.



Establecimiento

La densidad de plantación del componente arbóreo en trabajos de oasisificación varía mucho según los autores (Martínez de Azagra y Mongil, 2001). Por sus características ecológicas y productivas, parece recomendable que la densidad se adecue al objetivo de la plantación, aunque siempre se debe conseguir formaciones constituidas por un número mínimo de pies. Para las actuaciones de oasisificación con algarrobo se recomiendan densidades bajas (< 100 pies ha^{-1}), con árboles distribuidos en forma de bosquetes ("bosques islas") sobre estructuras hidrológicas (marco aproximado de 6×6 m) (Fig. 5.45). En el caso de redes de drenaje muy torrenciales, se debe renunciar a la regularidad de la plantación; por el contrario, se ubicarán las plantas sobre pequeñas estructuras de retención, como albarradas o pequeños diques de mampostería en seco o gaviones, donde sea posible aprovechar los sedimentos retenidos y generar cierta compensación hídrica. Esta práctica, junto con un mínimo de cuidados culturales, permite lograr el éxito en el establecimiento de la plantación.

El resultado final es una estructura dendrítica revegetada por bosquetes en las localizaciones más favorables, dejando sin repoblar las zonas con más dificultad. En este caso hay que orientar la plantación a los microhábitats con mayor disponibilidad hídrica y mayor profundidad de suelo, donde puede emplearse una densidad en torno a 50 pies ha^{-1} . Este diseño general se refuerza con pequeños bosquetes sobre las estructuras hidráulicas, lo que supone marcos de plantación densos de forma puntual de 6×4 m o $9 \times 4,5$ m, que irá disminuyendo progresivamente hacia las partes más alejadas del cauce. Estas últimas se dejarían para otras especies propias de matorrales xerofíticos o repoblaciones protectoras ya existentes (*P. halepensis*) y en densidad variable. La estructura creada conseguirá proporcionar una matriz de vegetación más compleja. Al ser moderada la competencia, las plantas se mantienen con un elevado vigor vegetativo y una buena ramificación (Fig. 5.45, Fig. 5.46).

A pesar de lo que podría pensarse, este tipo de plantaciones suele tener un porcentaje de marras bajo, dada las condiciones de establecimiento que buscan la compensación hídrica, así como la facilidad para suministrar cuidados culturales adecuados a la plantación (pequeños riegos de establecimiento, tubos protectores, *mulch* de piedra, etc.). En estas condiciones, el algarrobo crece con rapidez, por lo que se recomienda este modelo para reducir procesos de desertificación en áreas sensibles, contribuyendo a mejorar los flujos hídricos en cuencas torrenciales.

Además, la especie promueve la mejorar de las características fisicoquímicas del suelo, lo que contribuye a mejorar su estructura y, por lo tanto, su capacidad de infiltración. Este proceso permite, de forma simultánea o progresiva, la introducción de otras especies, como el olivo y la higuera que, junto con la abundante producción de frutos de algarrobo a lo largo de prácticamente todo el año, hacen de estas plantaciones un elemento importante en ambientes muy degradados, al contribuir a la alimentación de la fauna doméstica y silvestre (Fig. 5.47).



Figura 5.45. Plantación de oasisificación de algarrobo en Almería (QUERAT, 2024).



Figura 5.46. Plantación de oasisificación de algarrobo en Almería (QUERAT, 2024).



Figura 5.47. Integración paisajística de plantaciones de algarrobo en una zona árida (Almería) (QUERAT, 2024).

El método de implantación recomendado para el algarrobo en trabajos de oasisificación es la plantación manual. Resulta fundamental la elección de la procedencia de la semilla para asegurar su éxito (Rosúa et al., 2001). Además, al ser plantaciones de protección, se debe elegir un material forestal diverso genéticamente. Las plantaciones deben hacerse en otoño, dado que no existe riesgo de heladas. Hay que evitar retrasos en la fecha de plantación (nunca más tarde de enero), ya que pueden comprometer la supervivencia de las plantaciones, en particular en suelos muy pedregosos o de escasa profundidad efectiva. Las características de la planta tipo de algarrobo para labores de oasisificación puede ser planta de una savia en contenedor forestal ($> 200 \text{ cm}^3$) típicamente utilizada en repoblaciones genéricas, aunque se considera más recomendable planta en formato de mayor tamaño ($> 1000 \text{ cm}^3$) (Navarro Cerrillo et al., 2013) (ver Cap. 4).

El uso del algarrobo en trabajos de oasisificación requiere muy pocos cuidados culturales, más allá del establecimiento de las estructuras hidráulicas. Una vez colmatadas, no es necesario realizar ningún tipo de tratamiento a la vegetación. La preparación del suelo debe ser, preferentemente, mecanizada (ahoyado con retroexcavadora de pequeño tamaño, o bien ahoyado con barrena helicoidal si el suelo no es muy arcilloso), o manual (dada la baja densidad del arbolado). Los hoyos deben ser siempre de buen tamaño (60 x 60 x 60 cm) (Pemán et al., 2021). Es muy frecuente el uso de tubos invernadero, al igual que en otro tipo de plantaciones de algarrobo (Oliet et al., 2003). Una vez establecida la planta, conviene realizar una microcuenca para optimizar la infiltración en el entorno de la planta y colocar un *mulch* de piedra. En este tipo de plantaciones no suelen hacerse labores de control de la competencia, de fertilización o podas de formación. En la tabla 5.19 se resumen las principales actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo en trabajos de oasisificación.

Tabla 5.19. Resumen de actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo en trabajos de oasisificación.

Características generales	
Estación	Climas mediterráneos árido y semiárido III(IV) y IV(III), con precipitaciones < 300 mm
Objetivo	Restauración en zonas semiáridas
Características genéticas de la planta	Procedencia local de la región de identificación y utilización: Litoral suroccidental andaluz (38)
Planta tipo	1 savia en envases forestales (200-300 cm ³) (8-10 cm de altura)
Procedimiento de preparación	
Fecha de plantación	Noviembre - diciembre
Tratamiento previo de la vegetación	Motodesbrozadoras
Preparación del suelo	Ahoyado con retroexcavador o barrena helicoidal
Diseño de la plantación	Enriquecimiento o densificación a muy baja densidad (< 100 plantas ha ⁻¹)
Cuidados culturales después de la plantación	
Protección	Tubos invernadero perforados
Riegos	Riego de apoyo
Reposición de marras	Primer año
Escardas y binas	Ocasionalmente, escardas manuales
Manejo de la plantación	
Control de la competencia herbácea	Sin control de la competencia
Conformación de la copa	Sin podas
Fertilización	Sin fertilización

Parcela demostrativa MR2: finca La Alcantarilla (Mojácar, Almería)

Caracterización ambiental de la finca

La parcela se encuentra localizada en el término municipal de Mojácar (Almería) (Fig. 5.48). La zona se caracteriza por un fitoclima IV3 Mediterráneo (Tabla 5.20), con precipitaciones medias anuales entre 200 mm y 300 mm. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución de los lentiscales, coscojares y acebuchales, con presencia de espinal de azufaifos. En la actualidad, el paisaje está dominado por zonas de espartales y cultivos en invernadero en las zonas bajas.

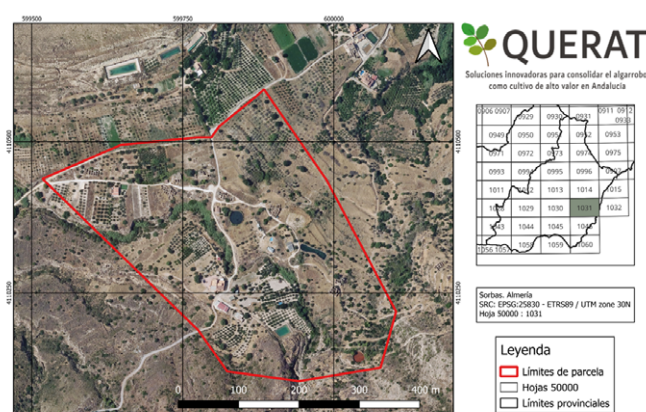


Figura 5.48. Localización y perímetro de la finca La Alcantarilla (Mojácar, Almería).

Tabla 5.20. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca La Alcantarilla (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
200-300	> 6	28-32	17-19	900-1000

Actuaciones

La plantación consiste en una población seminatural de algarrobo alrededor de casas de campo y del cauce de un arroyo, favoreciendo la aparición de otras especies, lo que se corresponde con actuaciones de oasisificación. En la plantación, bajo la protección del algarrobo, ha comenzado a establecerse vegetación arbustiva compuesta por lentisco y acebuche (Fig. 5.49).



Figura 5.49. Oasisificación con algarrobo en La Alcantarilla (QUERAT, 2024).

Estado actual

La población de algarrobo presenta en la actualidad un arbolado al que se le aplican escasos cuidados culturales, más allá de la colecta de los frutos. La introducción de pies por plantación se ha ido extendiendo de forma irregular por los bordes de caminos acequias y arroyos. Esta expansión ha permitido el establecimiento natural de otras

especies como el lentisco y el acebuche. Los árboles tienen una vecería media, con algunos años con buenas cargas, si bien en la mayoría la carga de fruto es pequeña o inexistente (Tabla 5.21, Fig. 5.50).



Figura 5.50. Detalle de frutos de los individuos adultos presentes en la finca.

Tabla 5.21. Características de los frutos de la finca La Alcantarilla en la cosecha de los veranos de 2022 y 2023.

Caracterización de los frutos	
Longitud de la vaina (cm)	14,2
Peso de la vaina (g)	8,66
Rendimiento en garrofín (%)	16,39
Peso de 100 semillas (g)	13,90

Parcela demostrativa MR2: finca La Tórtola (Níjar, Almería)

Caracterización ambiental de la finca

La parcela está localizada en el término municipal de Níjar (Almería, Fig. 5.51). La zona se caracteriza por un fitoclima mediterráneo IV3 (Tabla 5.22), con precipitaciones medias anuales entre 200 mm y 300 mm. La vegetación potencial se corresponde con lentiscares y espinal de azufaifos, aunque en la actualidad el paisaje está dominado por espartales.

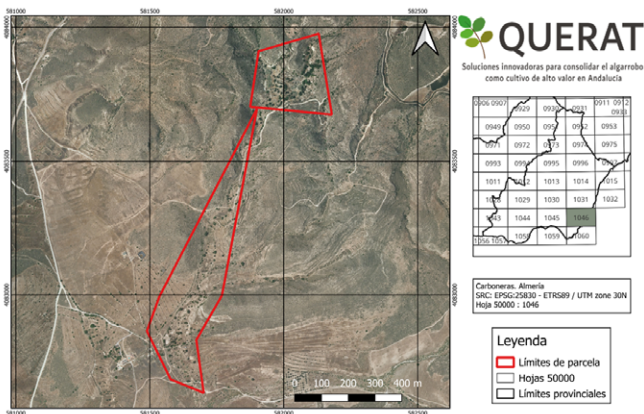


Figura 5.51. Localización y perímetro de la finca La Tórtola (Níjar, Almería).

Tabla 5.22. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca La Tórtola (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
200-300	> 6	28-32	17-19	900-1000

Actuaciones

La población de algarrobo tiene un origen natural, asociada a antiguas actividades agrícolas y ganaderas, cuyo abandono ha favorecido el establecimiento de vegetación propia del área, como el lentisco y el acebuche, lo que ha creado una vegetación más exuberante que en zonas colindante. En ese sentido, se trata de una población de algarrobo totalmente naturalizada y sin ningún tipo de tratamiento cultural (Fig. 5.52).



Figura 5.52. Oasificación con algarrobo en la finca La Tórtola (QUERAT, 2024).

Estado actual

Los ejemplares de algarrobo oscilan entre el metro y los 10 m de altura y con diámetros normales muy dispares por la naturaleza irregular de la plantación. Debido a la zona donde se ubican y a la falta de cuidados culturales, esta plantación muestra una vecería muy alta y una producción prácticamente inexistente.

5.6.3. Modelo MR3. Plantaciones de algarrobo para la diversificación de paisajes agrícolas

Objetivos y descripción del modelo

El objetivo de estas plantaciones es diversificar y complementar el paisaje agrícola, así como incrementar su capacidad productiva, en particular en olivares y, en menor medida, en plantaciones de almendro, donde el algarrobo ya aparece de forma ocasional junto con otras especies forestales (*Quercus ilex*, *Q. coccifera*, *Pinus halepensis*) o matorrales xerófilos. Este modelo favorece la diversificación de la vegetación en terrenos agrícolas con baja productividad y la densificación de cubiertas

en la matriz agrícola (mosaicos de vegetación agrícola y forestal). Esta estrategia es particularmente interesante en comarcas de mayor sensibilidad al cambio climático, donde contribuye a formar este tipo de mosaicos que tienen una función crucial en la diversificación de los paisajes agrarios, incluida una posible producción “informal”. Este tipo de paisajes optimiza la protección del suelo, la lucha contra la desertificación y reduce el riesgo de perturbaciones (ej., incendios o sequías), contribuyendo a preservar el suelo y a la conservación de la biodiversidad, diversificando los servicios ambientales.

Por tanto, el diseño de las plantaciones implica la creación de mosaicos (en parcelas pequeñas o medianas) usando el algarrobo como especie complementaria en el interior de las plantaciones de olivos o almendros. Se trata de favorecer la plantación de material seleccionado de variedades de vigor alto, con marcos de plantación de densidad media o baja (9 x 10 m, 12 x 8 m, ~100 pies ha⁻¹), orientado al complemento productivo de terrenos agrícolas marginales que permitan cierta capacidad de cosecha informal de algarroba. Este sistema comparte modelos agrícolas en mosaico usados ampliamente en Andalucía (ej., Aljaraque, Montes de Málaga, etc.) y se basa en la incorporación del algarrobo como un elemento singular del paisaje agrario. El establecimiento en estas condiciones es sencillo, dada la plasticidad de la especie y su facilidad para ocupar terrenos de baja productividad.

Área potencial de implantación

Las áreas de mayor potencial para el establecimiento de plantaciones algarrobo con objetivo de diversificación de la vegetación en terrenos agrícolas se corresponden con las provincias de Córdoba, Málaga y Cádiz y, ocasionalmente, Sevilla y Jaén. El área de distribución óptima para este modelo coincide con la asociación de esta especie con especies más propias de cultivos leñosos, en particular olivares y, en menor medida, el almendro, donde ya aparece de forma ocasional en el paisaje agroforestal, junto con otras especies forestales (*Quercus ilex*, *Q. coccifera*, *Pinus halepensis*) o matorrales xerófilos. En estas condiciones el algarrobo habita en climas mediterráneos típicos (IV2, IV3 y IV4), en áreas con una temperatura media invernal en torno a 10 °C y una temperatura media estival no inferior a 20 °C durante, al menos, cuatro meses al año y con un régimen térmico moderado (Ruiz de la Torre, 2006) (ver Fig. 5.5). En este modelo se debe evitar establecer el algarrobo en áreas con temperaturas inferiores a 0 °C (-4 °C) y con pluviometría anual superior a 300 mm.

Establecimiento

A partir de los modelos de plantación propuestos para el algarrobo (Spina, 1989; Tous y Franquet, 2024), en el caso de las actuaciones de diversificación del paisaje agrario se recomiendan densidades bajas (~100 pies ha⁻¹) con pies distribuidos en forma de bosquetes (“bosques islas”) en pequeñas superficies de baja calidad edáfica (marco aproximado de 6 x 8 m). Otra opción es la introducción del algarrobo en el interior de las plantaciones de olivo a través de la densificación de las plantaciones tradicionales (Fig. 5.53). En este último caso, puede emplearse una densidad en torno a 100 pies ha⁻¹, que puede reducirse progresivamente hacia las partes de mayor producción (< 50 pies ha⁻¹), que se dejarían para el cultivo leñoso ya existente. La estructura creada consigue proporcionar una matriz de vegetación más compleja, con una competencia moderada que permitirá que las plantas mantengan un elevado vigor vegetativo y una buena capacidad de producción.



Figura 5.53. Paisaje agroforestal mediterráneo con presencia de algarrobo (QUERAT, 2024).

El método de repoblación recomendado para el algarrobo en trabajos de diversificación del paisaje agrario es la plantación manual. Resulta fundamental la elección de la procedencia de los materiales de reproducción y de la planta de vivero para asegurar el éxito de la plantación. Al tratarse de plantaciones de diversificación, debe ser un material seleccionado que optimice la producción, ya que es posible aportar cuidados culturales a las plantas. La plantación debe hacerse en otoño y evitar retrasos que pueden comprometer la supervivencia de las plantaciones, en particular en suelos muy pedregosos o de escasa profundidad efectiva. Las características de la planta tipo para este tipo de plantaciones es planta de dos savias en contenedor de gran volumen ($> 1000 \text{ cm}^3$) (Navarro Cerrillo et al., 2013, Cap. 4), injertada o no. En este modelo, la selección varietal no es tan importante, aunque, es preferible usar material seleccionado o material autóctono de calidad contrastada.

La preparación del suelo se debe hacer preferiblemente con subsolador agrícola aprovechando las labores propias de la explotación, lo que supone ya un tratamiento previo de la vegetación herbácea (Fig. 5.54).



Figura 5.54. Plantación de diversificación del paisaje agrario con algarrobo en la provincia de Córdoba (QUERAT, 2024).

Un aspecto fundamental de este tipo de plantaciones es la poda de formación y fructificación. El gran potencial de crecimiento del algarrobo posibilita una rápida entrada en producción, por lo que es necesario gestionar adecuadamente la formación del árbol, adaptándolo a las necesidades de mecanización de la explotación

(ver MP2 y MP3). En lo que respecta a la incidencia de plagas y enfermedades, se recomienda consultar lo desarrollado previamente en el modelo MP1. En la tabla 5.23 se resumen las principales actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo.

Tabla 5.23. Resumen de actuaciones para el establecimiento y manejo de plantaciones de algarrobo con objetivo de diversificación del paisaje.

Características generales	
Estación	Climas mediterráneos típico (IV2, IV3 y IV4), en zonas libres de heladas
Objetivo	Diversificación del paisaje agrario
Características genéticas de la planta	Procedencia local según regiones de identificación y utilización: Orla meridional de la depresión del Guadalquivir (41), Serranía de Ronda (42), Depresión del Guadalquivir (44) y Sierra Morena meridional (45)
Planta tipo	1-2 savia2 en envases forestales (500-1000 cm ³) (25-50 cm de altura)
Procedimiento de preparación	
Fecha de plantación	Noviembre - marzo
Tratamiento previo de la vegetación	Simultáneo a la plantación
Preparación del suelo	Subsolador acoplado a tractor agrícola
Diseño de la plantación	Plantaciones regulares (< 100 plantas ha ⁻¹)
Cuidados culturales después de la plantación	
Protección	Tubos invernadero perforados. Mallas de sombreo
Riegos	Riego de establecimiento
Reposición de marras	Primer año
Escardas y binas	Escardas manuales
Manejo de la plantación	
Control de la competencia herbácea	Sin control de la competencia
Conformación de la copa	Podas de formación y fructificación
Fertilización	Sin fertilización

Parcela demostrativa MR3: finca Rozas Altas (Gaucín, Málaga)

Caracterización ambiental de la zona de restauración

La parcela demostrativa de plantación de algarrobo para la diversificación de paisajes agrícolas se encuentra en el término municipal de Gaucín (Málaga) (Fig. 5.55). La zona se caracteriza por un fitoclima mediterráneo IV4 (Tabla 5.24), con precipitaciones medias anuales entre 800 mm y 1200 mm. La vegetación potencial se corresponde con el área de distribución del alcornoque, sobre litosoles, luvisoles crómicos y rendsinas de poca profundidad. En la actualidad el paisaje está dominado por zonas de monte y cultivos agrícolas leñosos y abandonados.

Actuaciones

Se trata de una finca agrícola de cultivos de almendro y olivo, con presencia de algarrobos antiguos en los límites de la parcela. Los pies están injertados con los cultivares tradicionales Negra de Gaucín y Rubia de Gaucín. Las plantaciones de cultivos leñosos

se están diversificando desde 2010 con algarrobo ocupando las áreas sin árboles y establecido con un marco irregular (Fig. 5.56). Se trata de una finca con pendientes muy acusadas, de hasta el 70 %.

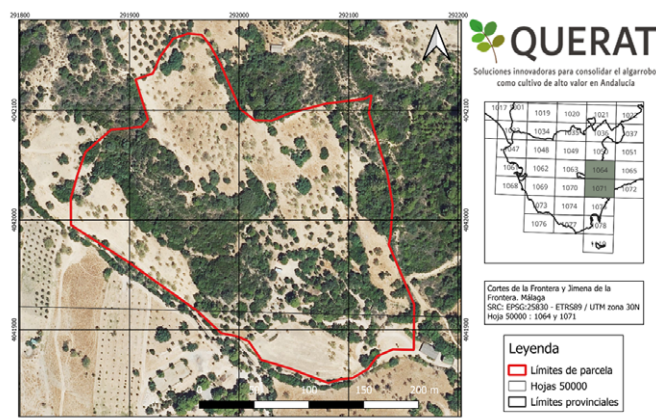


Figura 5.55. Localización y perímetro de la parcela en la finca Rozas Altas (Gaucín, Málaga).

Tabla 5.24. Condiciones climáticas medias en la parcela de la finca Rozas Altas (fuente: Mapas temáticos sobre variables climáticas ofrecido por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios>).

Precipitación anual (mm año ⁻¹)	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Temperatura media anual (°C)	Evapotranspiración anual (mm año ⁻¹)
800-1200	4-6	28-32	15-17	800-900



Figura 5.56. Plantación de algarrobo para diversificación de paisajes agrícolas en la finca Rozas Altas (QUERAT, 2024).

Se utilizó planta forestal de vivero procedente de semilla con un tamaño de 20-30 cm de altura. La plantación se realizó de forma manual sobre el hoyo de plantación, a unos 20 cm de profundidad efectiva, y siempre en otoño con la tierra en tempero. Los cuidados culturales han sido muy limitados:

- Protección. Se usaron protectores con malla metálica sobre puntales de acero corrugado.
- Riegos. La plantación no recibió riegos de apoyo durante establecimiento.

- Laboreos. Se realizaron labores mediante arados de grada para controlar el tapiz herbáceo.
- Conformación y guiado. Se dieron podas de formación hasta obtener el tamaño ideal para el injerto. Una vez injertados, se han aplicado podas tradicionales de formación de la copa, a la vez que se tutoraban las plantas hasta 1 m de altura.
- Injertado. La planta se injertó conforme iba superando la altura de diente del ganado (1-1,5 m). Se realizó injerto de escudete con material de cultivares tradicionales de la zona.
- No se utilizaron hidrogeles o acolchados (*mulch*), ni se efectuaron enmiendas o fertilizaciones, salvo la incorporación de estiércol.
- Trabajos de mantenimiento. Los cuidados culturales posteriores son similares a otras plantaciones.

Estado actual

En la actualidad, la plantación está formada por individuos de algarrobo que oscilan entre 3 y 15 años, con densidad variable según las características del terreno y del cultivo agrícola. La talla en los árboles oscila entre 0,8 m y 7 m de altura y 1 a 15 cm de diámetro normal. Un 90 % está injertado con cultivares hembras y hermafroditas de la zona; el 10 % restante son machos que actúan como polinizadores. Existen árboles de algarrobo de gran tamaño y edad en las orillas de los cultivos que presentan injertos realizados hace tiempo.

La producción de los individuos jóvenes ha comenzado recientemente, aunque muestran vecería interanual, casi siempre con un año con menor producción seguido de otro con una buena carga de algarroba. La algarroba producida en esta finca tiene mayor cantidad de pulpa respecto a garrofín que las poblaciones naturales cercanas, al tratarse de cultivares tradicionales que se han seleccionado pensando en la alimentación del ganado. La variedad Rubia es una algarroba más vecera pero más fácil de desprender, mientras la Negra muestra menos vecería, pero mayor dificultad a la hora de la cosecha (Tabla 5.25, Fig. 5.57).



Figura 5.57. Detalle de frutos de los individuos adultos de las variedades tradicionales presentes en la finca.

Tabla 5.25. Características de los frutos de la finca Rozas Altas en la cosecha del verano de 2023.

Caracterización de los frutos		
	Rubia	Negra
Longitud de la vaina (cm)	20,6	15,4
Peso de la vaina (g)	11,72	23,60
Rendimiento en garrofín (%)	14,16	10,94
Peso de 100 semillas (g)	18,81	19,86

Bibliografía

- Allué Andrade, J.L. (1990). Atlas fitoclimático de España: taxonomías. ICONA, Madrid.
- Ashkenazi, E., Avni, Y., Chen, Y. (2020). The vitality of fruit trees in ancient Bedouin orchards in the Arid Negev Highlands (Israel): Implications of climatic change and environmental stability. *Quat. Int.*, 545, 73-86.
- Batlle, I., Tous, J. (1997). Carob tree. *Ceratonia siliqua* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Vol. 17. IPGRI-IPK, Rome.
- Gómez Sanz, V., Rosselló, R.E. (1997). Investigación de las marras causadas por factores ecológicos de naturaleza meteorológica. *Soc. Esp. Cienc. For.*, (4), 13-25.
- Junta de Andalucía (2020). Plan Forestal Andaluz Horizonte 2030. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible.
- Manso, J.M.; de Azagra Paredes, A.M. (2007). Técnicas de recolección de agua y de "oasificación" para el desarrollo de la agricultura y la restauración forestal en regiones desfavorecidas. *Cuad. Geog. UG*, 40(1), 67-80.
- Martínez de Azagra, A. (1996). Diseño de sistemas de recolección de agua para la plantación forestal. Mundi-Prensa, Madrid.
- Martínez de Azagra, A.; Mongil, J. (2001). Algunos criterios para el diseño de sistemas de recolección de agua en repoblaciones forestales. *Actas III Congreso Forestal Español*, Mesa 3, 272-277.
- Millán, J.G., Berlanga, Á.Q., Arriaga, M.A., Gallo, B.A., Soldevilla, C.G., Madrid, R.B., Rodríguez, J.M. (2015). Algarrobo (*ceratonia siliqua*, l.) en dehesas de Sierra Morena: Abundancia poblacional y dispersión endozoócora. In *Pastos y Forrajes en el siglo XXI* (pp. 341-348). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.
- Morales Gil, A. (1969). El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. *Pap. Geogr. UM*. 1: 167-183.
- Navarro Hevia, J., de Araújo, J.C., Manso, J.M. (2014). Assessment of 80 years of ancient-badlands restoration in Saldaña, Spain. *Earth Surf. Process. Landf.*, 39(12), 1563-1575.
- Navarro Cerrillo, R.M., del Campo, A., Ceacero C. (2001). Caracterización del cultivo y determinación de calidad de planta de *Ceratonia siliqua* L. y *Olea europaea* L. var. *sylvestris* Brot. en varios viveros forestales. En: *Actas del III Congreso Forestal Español* (Junta de Andalucía, ed.). Granada. Mesa 3. pp. 861-868.
- Navarro Cerrillo, R.M., Sánchez Lancha, A., Arroyo Sauces, M., Plaza, I., Mallofret E., Lara, M., (2013). *Ceratonia siliqua*. En: Pemán, J., Navarro Cerrillo, R.M., Nicolás, J.L., Prada, M., Serrada, R., Producción y manejo de semillas y plantas forestales (tomo II). Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Oliet, J., Navarro Cerrillo, R.M., Contreras, O. (2003). Evaluación de la aplicación de tubos y mejoradores en repoblaciones forestales. *Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía*. Sevilla.
- Pemán García, R. M.; Navarro Cerrillo, R. M.; Prada, M. A.; Serrada Hierro, R. (2021). Bases técnicas y ecológicas del proyecto de plantación forestal. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Planelles, R., Oliet, J., Artero, F., Lopez, M. (2001). Efecto de distintas dosis N-P-K sobre la calidad funcional de planta de *Ceratonia siliqua*. Respuesta en plantación. En: *Actas del III Congreso Forestal Español* (Junta de Andalucía, ed.). Granada. Mesa 3. pp. 599-605.
- QUERAT (2024). Informe final Grupo Operativo QUERAT. Universidad de Córdoba.
- Rosúa Campos J.L., López de Hierro López, L., Martín Molero, J.C., Serrano Bernardo, F.A., Sánchez Lancha, A. (2001). Procedencias de las Especies Vegetales Autóctonas de Andalucía Utilizadas en Restauración de la Cubierta Vegetal. Tomos I, II. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente.
- Ruiz de la Torre, J. (2006). Flora Mayor. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Dirección General para la Biodiversidad, Madrid, España.

Sánchez-Oliver, J.S., Rey Benayas, J.M., Carrascal, L. M. (2014). Differential effects of local habitat and landscape characteristics on bird communities in Mediterranean afforestations motivated by the EU Common Agrarian Policy. *Eur. J. Wildl. Res.*, 60(1), 135-143.

Spina, P. (1989). *El algarrobo*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

Tous, J. Franquet Bernis, J. (2024). *El algarrobo*. Onada Edicions, Barcelona.

Tous, J., Batlle, I. (1990). *El algarrobo*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

Trapero, A. (2022). *Enfermedades del cultivo del algarrobo*. Jornadas sobre de algarrobo, EIG, Córdoba.

Vadell, E., Miguel, S. de, Centeno, G.F., Robla, E., Lerner, M., García, J.P. (2019). La forestación de tierras agrícolas: balance de un instrumento de política forestal para el cambio del uso de la tierra. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 45, 1–20.

6. Secuestro de carbono en plantaciones de algarrobo

**Rafael M.^a Navarro Cerrillo
Juan Ortega Roperó
Miguel A. Lara Gómez
Guillermo Palacios Rodríguez**

6.1. Introducción

En las últimas décadas, el cambio climático inducido por el aumento de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO_2), se ha consolidado como uno de los desafíos ambientales más urgentes. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha destacado repetidamente la necesidad de mitigar las emisiones de CO_2 para limitar el calentamiento global a niveles seguros (IPCC, 2023). En este contexto, los ecosistemas terrestres desempeñan un papel crucial como sumideros naturales de carbono y, dentro de ellos, los sistemas forestales –incluidas las plantaciones forestales– han cobrado creciente atención por su capacidad para capturar y almacenar carbono atmosférico. El informe urge a la aplicación de medidas encaminadas a cumplir los objetivos del Acuerdo de París que fija un aumento de la temperatura global entre 1,5 °C o 2 °C. Estas medidas deben aplicarse de manera inmediata y afectan profundamente en todos los sectores, incluyendo la energía, el transporte, la agricultura y la gestión de residuos. En este marco se contemplan diferentes actuaciones basadas en la disminución de concentraciones de CO_2 atmosférico, al ser el gas de efecto invernadero más abundante. Las estrategias que se plantean pasan por tres vertientes conjuntas (Schrag, 2007): reducción del consumo energético, descarbonización de los combustibles y secuestro de carbono.

Los ecosistemas forestales han demostrado tener una enorme capacidad de secuestro de carbono, tanto en la biomasa como en el suelo, lo que contribuye a reducir los efectos del calentamiento global (Ameray *et al.*, 2021). En particular, los bosques suponen uno de los grandes sumideros de carbono, junto con los océanos (Lal, 2007). Dicho carbono queda almacenado en metabolitos derivados de la fotosíntesis y en compuestos estructurales de la misma planta, así como en el terreno donde se asienta. Se estima que los bosques secuestran del orden de 7,6 $\text{GtCO}_2 \text{ año}^{-1}$ (Harris *et al.*, 2021), aunque esta cifra podría aumentar en 1,2-5,8 $\text{GtCO}_2 \text{ año}^{-1}$ mediante una política de incentivos (Yu *et al.*, 2021). En cuanto a los productos madereros, suponen unas 335 $\text{MtCO}_2 \text{ año}^{-1}$ (Johnston y Radeloff, 2019); aunque esta cantidad no está incluida en la estimación de la captura de carbono por parte de los bosques, se trata de una fracción importante de carbono que no retorna a la atmósfera a medio o largo plazo.

A nivel global, se estima que las plantaciones forestales ocupan cerca del 7 % del área forestal mundial, pero representan una proporción desproporcionadamente alta del volumen de madera producido y del carbono capturado anualmente (FAO, 2020). Su papel en las estrategias nacionales de mitigación, como las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDCs) bajo el Acuerdo de París, es cada vez más relevante. Aunque las plantaciones forestales han sido objeto de críticas por su menor biodiversidad relativa o por su carácter monoespecífico, su contribución al balance global de carbono no es menor. Varios estudios han mostrado que las plantaciones, en particular con especies como *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp. o *Populus* spp., bajo condiciones adecuadas de gestión, pueden acumular entre 5 y 20 toneladas de carbono por hectárea (Mg ha^{-1}) al año en biomasa aérea (Paul *et al.*,

2022). Además, los suelos bajo estas plantaciones también funcionan como depósitos importantes de carbono orgánico, aunque la magnitud y estabilidad de este almacenamiento dependen de factores como el uso previo del suelo, la especie plantada, la rotación y las prácticas de manejo (Berthrong *et al.*, 2012).

Un aspecto clave del secuestro de carbono en plantaciones es su temporalidad y permanencia. A diferencia de los sumideros geológicos, el carbono almacenado en biomasa forestal es vulnerable a perturbaciones como incendios, plagas, cambios en el uso del suelo o talas prematuras. Por ello, su contribución efectiva a la mitigación climática depende de estrategias integrales de manejo forestal sostenible, que aseguren tanto la productividad como la estabilidad ecológica del sistema (Canadell y Raupach, 2008). Asimismo, el valor del secuestro de carbono en plantaciones forestales no se limita al almacenamiento directo. También se reconoce su aporte indirecto a través de la sustitución de materiales y energía fósil. La utilización de productos forestales maderables en lugar de materiales más intensivos en carbono, como el acero o el hormigón, o la producción de bioenergía a partir de residuos forestales, contribuyen a reducir las emisiones netas (Tupenaite *et al.*, 2023).

Las plantaciones agroforestales tienen un papel fundamental en la captura de carbono al establecer sumideros a largo plazo en terrenos sujetos a constante alteración (Ghale *et al.*, 2022). En particular, el uso de especies propias de cultivos leñosos (ej., olivo, almendro, algarrobo) representa una alternativa interesante para secuestrar carbono (Pérez-Pastor *et al.*, 2018; Repullo *et al.*, 2021; Torrús-Castillo *et al.*, 2023). De hecho, se ha demostrado que los sistemas agroforestales pueden capturar entre 1,5 y 3 veces más carbono que los sistemas agrícolas convencionales (Ghale *et al.*, 2022), tanto en la biomasa como en el suelo, dada la mayor funcionalidad ecológica de estas plantaciones, y el aumento de la materia orgánica (Hutchinson *et al.*, 2007). En este marco, es necesario destacar el papel de las especies subutilizadas (*neglected and underutilised species*, NUS en sus siglas en inglés) como instrumento válido para promover, no sólo la agricultura, sino también el desarrollo sostenible en las zonas rurales. Esto se debe, entre otras cosas, a la falta de conocimiento sobre la gran cantidad de NUS existentes en el Mediterráneo (ej., algarrobo, argán, higuera, etc.) y su potencial (Libiad *et al.*, 2021; El Bilali *et al.*, 2023).

El algarrobo emerge como una especie de un alto potencial para plantaciones en clima mediterráneo, entre otras cosas, por su adaptabilidad a condiciones adversas y marginales, la tolerancia a estreses bióticos y abióticos (p. ej., plagas y enfermedades, sequía), su capacidad de crecer en suelos calizos o degradados y su sistema radical profundo y robusto que permite una fijación efectiva de carbono en el suelo, además de mejorar la estructura y fertilidad del mismo, y la baja necesidad de insumos externos para mantener niveles elevados de producción (Tous y Franquet, 2024). El algarrobo no fija nitrógeno atmosférico, pero sí acumula y recicla eficientemente el nitrógeno absorbido del suelo, jugando un papel importante en la fertilidad y estabilidad del suelo en climas mediterráneos. Esta característica mejora el balance energético del sistema agroforestal y lo convierte en una herramienta de bajo impacto para la restauración climáticamente inteligente de paisajes degradados (Padulosi *et al.*, 2012; El Bilali *et al.*, 2023). Por el contrario, siguen existiendo limitaciones derivadas del difícil acceso a materiales vegetales de calidad, al desarrollo de modelos “agroforestales” de alta productividad y a la incorporación de tecnologías similares a otros cultivos leñosos (ej., el olivo). La mayor demanda creciente de los productos derivados del algarrobo en el mercado mundial, así como la creciente atención a

la sostenibilidad y la resiliencia en todo el sistema agroalimentario y la conservación en sistemas frágiles mediterráneos, representan la mejor oportunidad para la promoción del algarrobo.

En Andalucía, el algarrobo ocupa un lugar destacado, especialmente en áreas del litoral mediterráneo y en comarcas del interior semiárido (ver Cap. 1, Fig. 6.1). Tradicionalmente considerado como un cultivo marginal, el algarrobo ha sido revalorizado en las últimas décadas por su potencial ambiental, su rusticidad y la creciente demanda de productos derivados de su fruto —como la harina de algarroba y la goma— en mercados agroalimentarios sostenibles (Tous y Franquet, 2024). En estudios realizados en Andalucía, se ha observado que las plantaciones de algarrobo pueden acumular entre 25 y 45 Mg ha⁻¹ en biomasa aérea en plantaciones adultas, y hasta 80 Mg ha⁻¹ en el suelo, dependiendo de la densidad de plantación y del manejo aplicado (Palacios Rodríguez *et al.*, 2021). Perez-Pastor *et al.* (2018) estimó una capacidad de secuestro de CO₂ entre 18,67 y 20,82 Mg CO₂ ha⁻¹ (5,1 y 5,7 Mg C ha⁻¹). Estos valores son similares a los indicados por Geraldo *et al.* (2010) para el Algarve (Portugal), con un valor medio de 15,55 Mg CO₂ ha⁻¹ (4,23 Mg C ha⁻¹). Esto supone que, frente a especies de rotación corta como *Eucalyptus* spp. o *Populus* spp., el algarrobo ofrece un modelo de secuestro de carbono más conservador, pero más estable, con un bajo riesgo de reversión asociado a perturbaciones naturales o prácticas de manejo intensivas. Además, muchas plantaciones de algarrobo en Andalucía adoptan una estructura agroforestal mixta, combinando forestaciones o árboles adultos con cultivos leñosos o pastoreo extensivo, generando paisajes en mosaico con alto valor ecológico y con un alto potencial de secuestro de carbono.



Figura 6.1. Tipos de plantaciones de algarrobo en Andalucía (de izquierda a derecha y de arriba a abajo): forestación de tierras agrarias, árboles dispersos sin un marco regular, plantaciones en el límite de una parcela agrícola, plantación de algarrobo junto con olivo (fuente: Grupo Operativo QUERAT).

6.2. El programa de forestación de la UE en Andalucía: potencial de secuestro de carbono

La UE llevó a cabo una reforma de la Política Agraria Común (PAC) en 1992, que incluía un Programa de Forestación de Tierras Agrarias (PFTA). Este programa tenía por objetivo aumentar la superficie forestal en Europa, a la vez que se diversificaba la actividad agraria (Vadell *et al.*, 2019). Del mismo modo, se buscaba establecer nuevas fuentes de ingresos en sectores rurales y contribuir a la reducción del efecto invernadero mediante el establecimiento de sumideros de carbono. A tal fin se destinó parte del presupuesto de la PAC a la forestación y a otras medidas forestales (Vadell *et al.*, 2019).

El programa de PFTA se ha desarrollado sobre una superficie que supera la cifra de 730.000 ha a nivel nacional, estableciéndose como uno de los programas más ambiciosos de incentivos a particulares para la restauración de sistemas forestales (Vadell *et al.*, 2019). La mayor parte de esta superficie fue establecida en los años subsiguientes a la implantación del programa, reduciendo el número de actuaciones a medida que las superficies plantadas crecían. Más de la mitad de la superficie acogida a este programa siguió un esquema de plantaciones monoespecíficas con frondosas (Vadell *et al.*, 2019), con una clara dominancia del género *Quercus*. Por su parte, las forestaciones de algarrobo tuvieron una implantación menor, quedando por debajo de las 10.000 ha. En conjunto, la superficie de las plantaciones osciló, de media, entre 2 y 52 ha, según las diferentes CCAA (Vadell *et al.*, 2019). Del total de superficies forestadas con esta especie, el 56 % correspondió a terrenos dedicados previamente a cultivos herbáceos de secano y a zonas no cultivables, como eriales y pastizales (Vadell *et al.*, 2019).

En Andalucía, el PFTA quedó enmarcado en el Reglamento (CEE) 2080/92 de la Unión Europea y posteriormente fue adaptado a las condiciones específicas de la comunidad autónoma andaluza. Según datos recopilados por la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía, en el PFTA se establecieron más de 250.000 ha entre 1993 y 2007 (Tabla 6.1) y, aunque no existe un desglose detallado por especie en todas las provincias, se estima que el algarrobo representa entre el 8 y el 12 % (Junta de Andalucía, 2010).

El algarrobo, tradicionalmente infravalorado como especie propia de plantaciones forestales, se vio revalorizada dentro de este programa, especialmente en zonas de clima semiárido y suelos marginales del litoral mediterráneo andaluz (provincias de Málaga, Granada, Almería y parte de Cádiz y Sevilla) y de la provincia de Huelva. En este contexto, el PFTA promovió la plantación de algarrobo en modelos de densidad intermedia (300 pies ha⁻¹), en masas puras o mixtas, de las cuales 1.162 ha se correspondieron con plantaciones puras de la especie. Las localidades donde se hicieron las plantaciones están emplazadas en zonas con una gran divergencia climática, desde clima mediterráneo semioceánico (Huelva), hasta un clima mediterráneo semiárido (Almería), pero que en su conjunto se caracterizan por temperaturas medias anuales cercanas a los 17 °C con veranos calurosos y secos e inviernos suaves y húmedos, lo que resulta crucial

debido a la sensibilidad de la especie a las heladas (Dahmani *et al.*, 2023). Por su parte, las precipitaciones anuales superan los 500 mm año⁻¹, salvo en los expedientes de Almería que se sitúan en valores cercanos a los 250 mm año⁻¹.

El algarrobo, dentro de los programas de forestación de tierras agrarias ha generado una superficie muy importante de plantaciones de baja densidad (<300 pies ha⁻¹, Fig. 6.1), y que integran especies forestales (ej., mixtas con encina, acebuche; en menor medida, alcornoque) con vegetación leñosa o herbácea derivada de la no intervención sobre muchas de estas plantaciones. Las forestaciones se sitúan en su mayoría sobre terrenos llanos o moderadamente ondulados sobre todo en las provincias de Huelva, Sevilla y Cádiz, mientras que las de las provincias de Málaga y Granada presentan una topografía escarpada. Los algarrobos de estos expedientes de forestación fueron plantados en su mayoría entre 1992 y 1994, siguiendo un marco regular de 5 x 6 m en toda su extensión, adaptando dicho marco a la topografía del terreno (Fig. 6.2).

El interés por el algarrobo ha aumentado en el contexto de la nueva PAC (2023–2027) y de los eco-regímenes que priorizan prácticas agrícolas sostenibles y contribuciones a la mitigación del cambio climático. Su inclusión en los planes de acción climática regionales y en proyectos de restauración ecológica financiados por fondos europeos (como LIFE o FEADER) refuerza su papel como especie clave para el futuro de los sistemas agroforestales en Andalucía.

Tabla 6.1. Plantaciones de algarrobo realizadas en Andalucía en el marco del Reglamento (CEE) 2080/92 de la Unión Europea, posteriormente adaptado a las condiciones específicas de la comunidad autónoma andaluza (fuente: Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural (Junta de Andalucía, 2020)).

Provincia	Nº expedientes forestaciones		Superficie forestada			
	Puras	Mixtas	Puras (ha)	Mixtas (ha)	Total (ha)	Proporción (%)
Almería	6	155	146,53	5.619,55	5.766,08	21,64
Cádiz	2	52	132,35	1.240,62	1.372,97	5,15
Córdoba	0	5	0,00	145,67	145,67	0,55
Granada	2	2	23,29	58,84	82,13	0,31
Huelva	14	204	614,01	10.361,47	10.975,48	41,19
Jaén	0	2	0,00	48,12	48,12	0,18
Málaga	9	7	300,28	2.387,25	2.687,53	10,09
Sevilla	5	124	88,74	5.476,08	5.564,82	20,89
Total	48	621	1.305,21	25.337,59	26.642,79	100,00

Figura 6.2. Plantación mixta de algarrobo y encina en el término municipal de Puebla de Guzmán (Huelva). La encina aparece en la ortofoto con un tono más azulado, y el algarrobo con verde más brillante (fuente: Ortega Ropero, 2022).



6.3. Secuestro de carbono en plantaciones de algarrobo

6.3.1. Procedimiento de estimación de carbono a partir de datos LiDAR de baja intensidad

En el marco del proyecto QUERAT se procedió a estimar el carbono secuestrado en las plantaciones puras de algarrobo en Andalucía (Fig. 6.3), siguiendo la metodología propuesta en trabajos previos (Trujillo García, 2008; Geraldo *et al.*, 2010; Palacios-Rodríguez *et al.* 2022, Navarro Cerrillo *et al.*, 2021; Ortega Roper, 2024; Fig. 6.4). En estos trabajos se desarrollaron ecuaciones alométricas de referencia para la especie (Tabla 6.2), usando como variables independientes el diámetro normal, el diámetro en la base del fuste y la altura del árbol. La metodología propuesta también propuso ecuaciones para la estimación del carbono orgánico del suelo (SOC₂₀, 0-20 cm) (Tabla 6.3). Los resultados obtenidos para la biomasa vegetal y para el SOC₂₀ se generalizaron a partir de datos LiDAR procedentes del Instituto Geográfico Nacional (<https://pnoa.ign.es/web/portal/pnoa-lidar>, 2015 a 2021, densidad de puntos de 0,5 puntos m⁻²). Por otro lado, se obtuvieron imágenes aéreas pancromáticas de alta resolución (resolución de 0,25 m y escala 1:25.000) a través del PNOA (<https://pnoa.ign.es/web/portal/pnoa-imagen>) (Fig. 6.5). El modelo propuesto permitió la segmentación de copas directamente sobre la ortofoto en cada uno de los expedientes (Fig. 6.6), fácilmente vectorizable (Fig. 6.5), dejando únicamente los polígonos que se corresponden con el estrato arbóreo.

Figura 6.3. Localización de los expedientes de forestación de algarrobo seleccionados para este estudio (fuente: Ortega Roper, 2022).

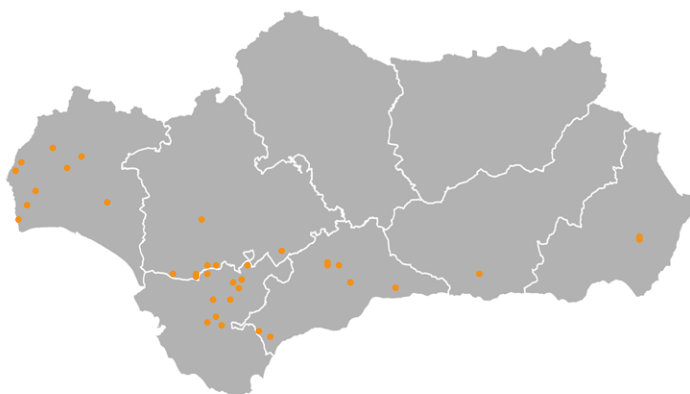


Tabla 6.2. Ecuaciones alométricas extraídas del procedimiento de división en fracciones y procesado de muestras para cada fracción, expresada en gramos. D=diámetro normal, cm; H=altura total, m (fuente: Palacios-Rodríguez *et al.*, 2022).

Fracción	Ecuación modelizada
Hojas	$W_f = e^{(5,2047 + 0,9515 \ln D + 1,4302 \ln H)}$
Ramas	$W_b = 271,3179 e^{0,0848 DH}$
Fuste	$W_s = e^{0,0600 DH}$
Raíces	$W_r = 2148,622 e^{0,0423 DH}$
Total	$W_T = \sum W_i$

Tabla 6.3. Ecuaciones para el cálculo del diámetro normal (D) y de carbono orgánico del suelo (SOC₂₀) a partir de la altura en metros de los pies derivada de datos LiDAR-PNOA (H_L) (fuente: Palacios-Rodríguez *et al.*, 2022).

Variable	Ecuación modelizada
D (cm)	$D = -2,0788 + 3,6730 H_L$
SOC ₂₀ (g m ⁻²)	$SOC_{20} = 1,1458 + H_L^{2,5639}$

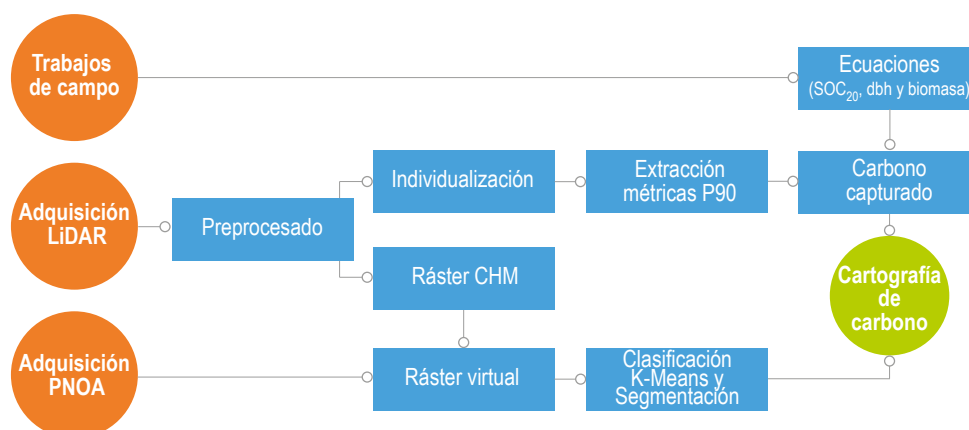


Figura 6.4. Flujo de trabajo seguido para la creación de la cartografía de cálculo de almacenes de carbono en plantación de algarrobo en Andalucía (fuente: Ortega Ropero, 2022).



Figura 6.5. Ejemplos de tipología de plantaciones de algarrobo en expedientes de forestación de tierras agraria en Andalucía (fuente: Ortega Ropero, 2022).

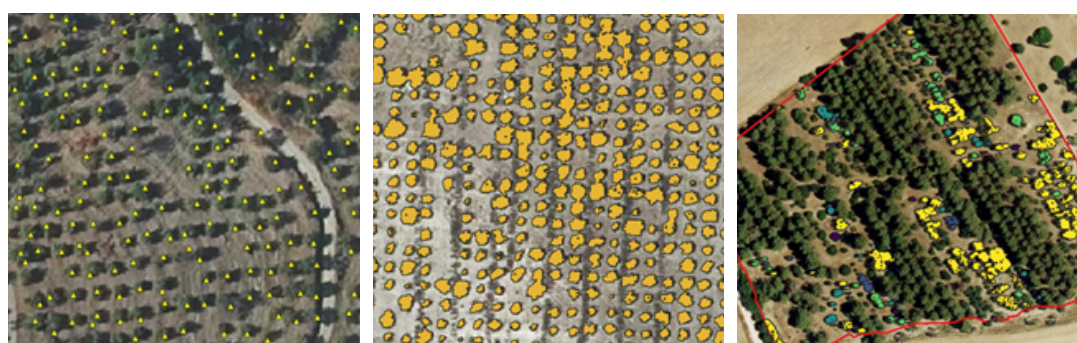


Figura 6.6. Identificación de árboles individuales (izquierda), mapa ráster de la segmentación de copas (centro), y ejemplo de expediente mixto filtrado (amarillo algarrobo) donde se aprecian especies secundarias como coníferas (color verde de la ortofoto), encina (verde ráster) y matorral (azul ráster) (derecha) (fuente: Ortega Ropero, 2022).

6.3.2. Estimación del número de individuos de algarrobo en plantaciones puras en Andalucía

En los cuarenta expedientes analizados se segmentaron un total de 92.428 árboles. Tras cruzar los datos con los provenientes de la individualización y realizar un filtrado usando la altura, quedaron 63.316 árboles que se corresponderían con individuos de algarrobo (Ortega Roper, 2022, Tabla 6.4). La altura media, considerando todos los pies, fue de 3,29 m, siendo la moda la clase 2,5 y 3,0 m (Fig. 6.7).

Tabla 6.4. Características selvícolas de las plantaciones de algarrobo en Andalucía y valores de carbono secuestrado en los diferentes almacenes por provincia. SOC₂₀ = carbono orgánico del suelo en el horizonte 0-20 cm.

Provincia	Superficie total (ha)	Fracción de cabida cubierta (%)	Nº pies	Altura media (m)	Diámetro normal (cm)	SOC ₂₀ (Mg C)	Biomasa total (Mg C)	Biomasa individual (kg árbol ⁻¹)
Almería	131,50	0,94	2453	2,53	7,23	207,32	40,27	16,42
Cádiz	218,23	23,31	16115	3,58	11,08	24345,50	2062,67	106,15
Granada	23,29	5,86	1963	3,40	10,40	477,22	234,43	121,66
Huelva	464,40	4,01	16463	3,24	9,83	6915,09	1409,76	86,54
Málaga	136,15	32,60	9776	3,59	11,11	19891,06	1646,01	173,21
Sevilla	188,37	11,76	16546	2,99	8,92	4587,12	427,61	32,73
Andalucía	1161,14	10,49	63316	3.29	10,00	56423,31	5820,76	92,87

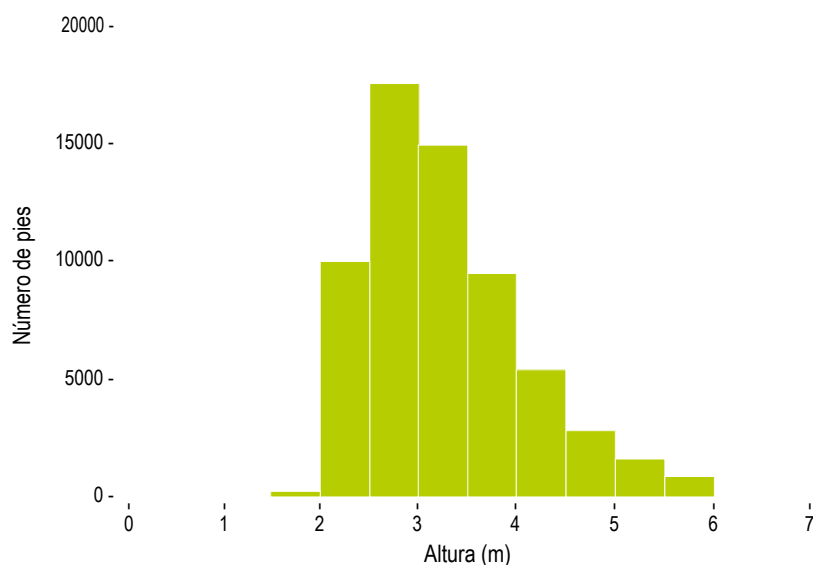


Figura 6.7. Distribución de alturas de los árboles de algarrobo en plantaciones en Andalucía (fuente: Ortega Roper, 2022).

6.3.3 La biomasa acumulada en plantaciones de algarrobo en Andalucía

Los valores de biomasa total se calcularon por provincias (Tabla 6.4; Fig. 6.8). Huelva es la provincia con más superficie plantada (464,40 ha), con una cobertura moderada (4,01 %) y la segunda provincia en número de árboles (16.463), así como el segundo valor más alto de SOC (6.915,09 Mg C) después de Málaga. Eso se traduce en una cantidad muy alta de biomasa total (1409,76 Mg C) y una moderada biomasa individual (86,54 kg árbol⁻¹). Cádiz es la segunda provincia con

mayor superficie (218,23 ha), una alta densidad de copa (23,31 %) y en número de árboles (16.115), con valores altos de altura y diámetro. La capacidad de secuestro de carbono, tanto en el suelo (24345,50 Mg C) como en la biomasa total (2062,67 Mg C), también es elevada. Sevilla tiene una superficie plantada considerable (188,37 ha) pero con árboles de altura baja y diámetros medio, que acumulan poca biomasa individual (32,73 kg árbol⁻¹), lo que sugiere árboles de menor vigor. No obstante, el valor de SOC total es alto (4587,12 Mg C), pero con una biomasa total moderada (1271,61 Mg C).

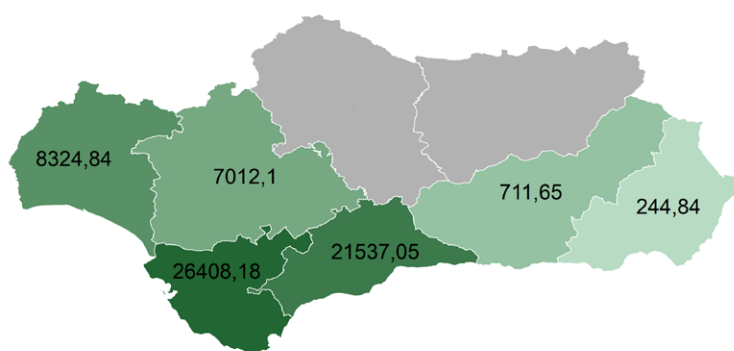


Figura 6.8. Carbono total capturado (en Mg) en plantaciones de algarrobo por provincia. Se incluye el carbono fijado en suelo (SOC₂₀) y en la biomasa (fuente: Ortega Ropero, 2022).

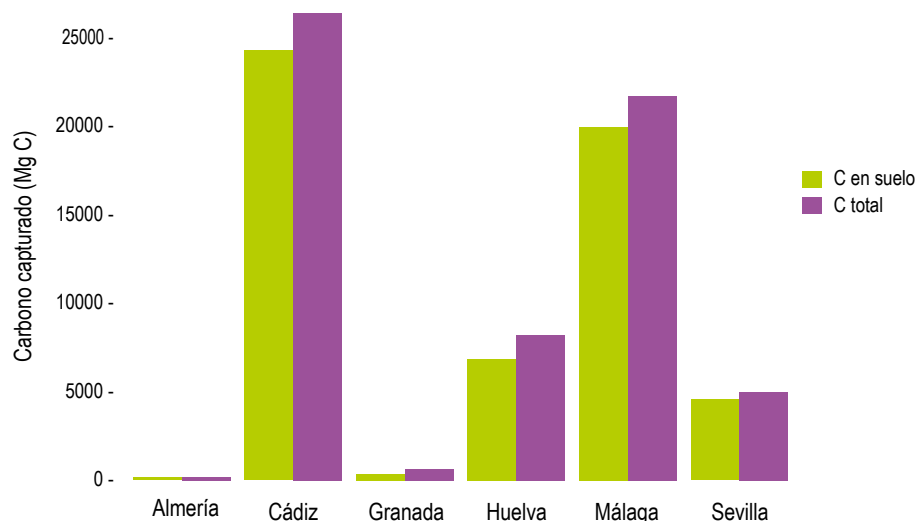
En las provincias orientales, Almería presentó una superficie plantada reducida (131,50 ha), con baja fracción de cabida cubierta (0,94 %) y altura de los árboles baja (2,53 m) y diámetro reducido. Esto supone que la capacidad de secuestro de carbono es muy baja, derivada de una biomasa total e individual y un valor moderado de SOC₂₀ (207,32 Mg C). Málaga presenta una superficie plantada media (136,15 ha), pero con una cobertura alta (32,60 %). Las plantaciones en esta provincia se caracterizan por su alta densidad y cobertura, lo que se traduce en la mayor capacidad de secuestro de carbono en el suelo (19,890,66 Mg C), la mayor biomasa individual (173,21 kg árbol⁻¹) y un valor elevado de biomasa total (1646,01 Mg C). Frente a Málaga, Granada tienen una superficie plantada muy pequeña (23,29 ha), pero con una cobertura buena (5,86 %) y un valor de biomasa individual alto (121,66 kg árbol⁻¹).

En término generales, Málaga destaca por su alta productividad por árbol y mayor biomasa individual, Cádiz y Huelva alcanzan los valores más elevados de superficie y biomasa total. Granada, aunque con poca superficie, presenta árboles con un buen crecimiento y una alta capacidad de secuestro individual de carbono. En cuanto al carbono en el suelo, Málaga presenta el valor de SOC₂₀ total más alto, seguida de Cádiz, indicando suelos con gran capacidad de secuestro de carbono. Almería, por sus particulares condiciones climáticas, presenta plantaciones con muy escaso desarrollo.

A nivel de toda Andalucía, a partir del vuelo LiDAR-PNOA 2019 (incluyendo árbol y carbono en suelo), se ha estimado que el carbono total capturado por las plantaciones puras de algarrobo fue de 62.224,07 Mg C. El promedio de biomasa contenida en los árboles detectados se encuentra en torno a los 92,87 kg árbol⁻¹, contando con todas las fracciones evaluadas. La relación entre la parte subterránea y la parte aérea fue de 0,21. Las raíces representaron el 17 % del total fijado, mientras que el resto de las fracciones supusieron un 17 % para el follaje, un 72 % para las ramas y un 1 % para el fuste.

El carbono almacenado en la fracción orgánica del suelo (SOC₂₀) fue de 48,59 Mg ha⁻¹, y una cantidad total almacenada de 56.423,31 Mg C para el conjunto de la comunidad autónoma. Del total de carbono capturado por los expedientes de forestación, el almacenado en el suelo representó el 90,64 % (Fig. 6.9).

Figura 6.9. Carbono secuestrado por provincias, tanto en suelo (SOC₂₀) como en total (fuente: Ortega Ropero, 2022).



6.4. Las plantaciones de algarrobo y su potencial de secuestro de carbono: una oportunidad para la especie

Los valores medios de carbono fijado por árbol (97,87 kg árbol⁻¹) están por encima de los estimados para la especie en plantaciones en Cádiz (50,67 kg árbol⁻¹, Palacios-Rodríguez *et al.*, 2022) con edades similares. Esta diferencia puede deberse a que en el primer caso se ha efectuado el cálculo a nivel regional, incluyendo un gradiente productivo (Huelva-Almería) que representa una variabilidad muy alta de condiciones ecológicas y de crecimiento. No debe olvidarse que algunas de estas plantaciones están sometidas a prácticas de manejo, como podas o injertos, que reducen el tamaño de la copa y derivan en cambios alométricos, que se traducen en errores en la estimación del carbono fijado por la planta.

La estimación global del carbono capturado por las plantaciones puras en Andalucía representa un valor medio por hectárea de 5,01 Mg C ha⁻¹, con grandes diferencias entre provincias, siendo Málaga (12,10 Mg C ha⁻¹) y Cádiz (9,45 Mg C ha⁻¹) las que fijan una mayor cantidad de carbono. Este valor es inferior al obtenido por Navarro Cerrillo *et al.* (2021) de 5,72 Mg C ha⁻¹, pero superior al obtenido por Geraldo *et al.* (2010) de 4,23 Mg C ha⁻¹, considerando sólo la biomasa área, y al obtenido por Palacios Rodríguez *et al.* (2022) de 4,30 Mg C ha⁻¹, considerando la biomasa total. Por otro lado, supera ligeramente los valores calculados para forestaciones realizadas con encina y alcornoque (4,89 C Mg ha⁻¹, Lara-Gómez *et al.*, 2020).

El valor medio del carbono orgánico del suelo (SOC₂₀) fue de 48,56 Mg C ha⁻¹, con un valor cercano a los obtenidos para esta especie (41,51 Mg C ha⁻¹; Palacios-Rodríguez *et al.*, 2022), y superior al determinado para forestaciones con encina y alcornoque (36,9 Mg C ha⁻¹ Lara-Gómez *et al.*, 2020, en ambos casos con edades similares). Estos valores también son superiores si se comparan con otros cultivos leñosos, como el olivar (26,1 Mg C ha⁻¹ López-Bellido *et al.*, 2016) o los viñedos (26,7 Mg C ha⁻¹, Novara *et al.*, 2017), destacando la importancia del algarrobo como especie secuestradora de carbono (Pérez Pastor *et al.*, 2018).

La cantidad total de carbono almacenada en el suelo (SOC_{20}) para toda Andalucía ha sido de 56.423,31 Mg C (2021), lo que representa aproximadamente el 90 % del carbono total capturado por las forestaciones (62.224 Mg C). Este dato reafirma el papel crítico del suelo como el principal almacén de carbono en sistemas agrosilvopastoriles y, más concretamente, en plantaciones forestales con orientación productiva (Kongsager *et al.*, 2013). A menudo, el protagonismo de la biomasa aérea en las estimaciones de captura de carbono eclipsa el potencial real del suelo, cuya capacidad de almacenamiento es más estable y persistente en el tiempo. En este contexto, los esfuerzos de forestación adquieren una dimensión estratégica no solo desde el punto de vista ecológico, sino también climático.

Las PFTA nacieron con el objetivo, entre otros, de fomentar el secuestro de carbono en suelos agrícolas de baja productividad, áreas que, tras haber sufrido procesos de degradación, perdieron buena parte de su funcionalidad ecológica. Dentro de este marco, el estudio realizado sobre las plantaciones puras de algarrobo en Andalucía aporta una evidencia valiosa del potencial de estas especies para funcionar como sumideros de carbono a múltiples niveles. Los resultados no solo ponen de manifiesto la contribución relevante del algarrobo a la acumulación de biomasa, sino que también evidencian una mejora en la calidad del suelo, al aumentar significativamente su capacidad de fijación de carbono orgánico del suelo frente a los cultivos agrícolas de referencia (Palacios Rodríguez *et al.*, 2022). Como han señalado Montagnini y Nair (2004), este tipo de plantaciones cumple una doble función: restaurar suelos degradados y aportar beneficios ambientales duraderos, una idea respaldada por los resultados ilustrados en las figuras 6.10.

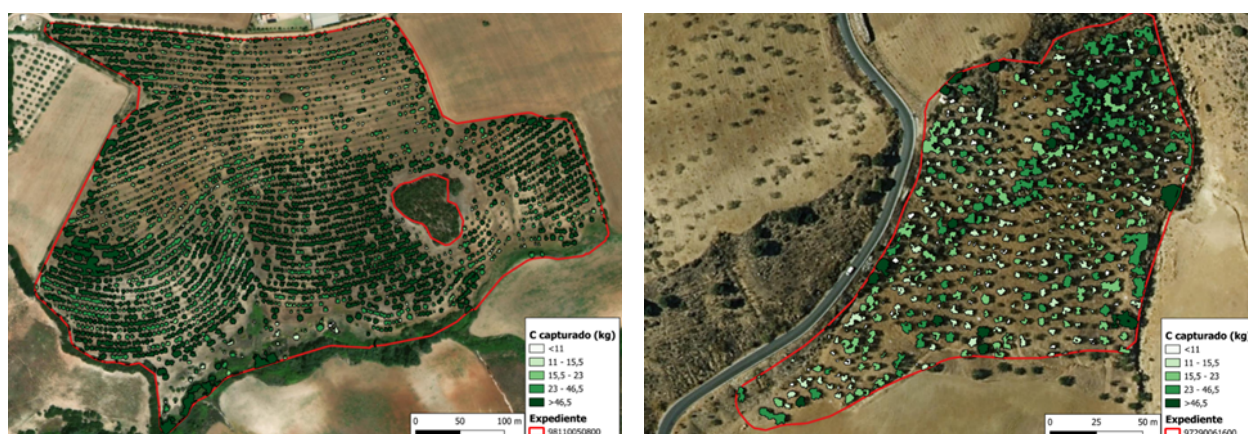


Figura 6.10: Distribución espacial del secuestro de carbono en dos plantaciones de forestación de tierras agrarias (fuente: Ortega Ropero, 2022).

La integración del algarrobo en plantaciones de producción se puede compatibilizar con su alto potencial de secuestro de carbono, lo que no es sólo una vía para la generación de rentas en áreas agrícolas de baja productividad o de marginalidad para otras especies (ej., olivo) incorporando modelos productivos de bajo consumos de recursos (ej., riego deficitario, cultivos ecológicos, aportes bajos de nutrientes), sino que también representa una estrategia eficaz de mitigación del cambio climático. Si esto se une a la capacidad como especie de alto potencial para la restauración ecológica y la mejora del capital natural, el algarrobo puede contribuir a adaptar los usos del suelo a un escenario climático incierto y representar una solución basada en la naturaleza con beneficios integrales en parte del territorio andaluz.

Bibliografía

- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., Montoro Girona, M., Cavard, X. (2021). Forest carbon management: A review of silvicultural practices and management strategies across boreal, temperate and tropical forests. *Curr. For. Rep.*, 7, 245-266.
- Berthrong, S. T., Plneiro, G., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B. (2012). Soil C and N changes with afforestation of grasslands across gradients of precipitation and plantation age. *Ecol. Applic.* 22(1), 76-86.
- Canadell, J. G., Raupach, M. R. (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320(5882), 1456-1457.
- Dahmani, W., Elaoui, N., Abousalim, A., Akissi, Z.L.E., Legssyer, A., Ziyat, A., Sahpaz, S. (2023). Exploring Carob (*Ceratonia siliqua* L.): A Comprehensive Assessment of Its Characteristics, Ethnomedicinal Uses, Phytochemical Aspects, and Pharmacological Activities. *Plants* 12, 3303.
- El Bilali, H., Cardone, G., De Falcis, E., Naino Jika, A. K., Rokka, S., Diawara, A. B., Ghione, A. (2023). Neglected and underutilised species (NUS): an analysis of strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT). *AGROFOR Inter. J.* 8(1), 19-29.
- FAO (2020). Global Forest Resources Assessment 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- Geraldo, D., Correia, P. J., Filipe, J., Nunes, L. (2010). Carob-tree as CO₂ sink in the carbon market. *Advances in climate changes, global warming, biological problems and natural hazards*, 119-122.
- Ghale, B., Mitra, E., Sodhi, H. S., Verma, A. K., Kumar, S. (2022). Carbon sequestration potential of agroforestry systems and its potential in climate change mitigation. *Water Air Soil Pol.* 233(7), 228.
- Harris, N.L., Gibbs, D.A., Baccini, A., Birdsey, R.A., de Bruin, S., Farina, M., Fatoyinbo, L., Hansen, M.C., Herold, M., Houghton, R.A., Potapov, P.V., Suarez, D.R., Roman-Cuesta, R.M., Saatchi, S.S., Slay, C.M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Change* 11, 234-240.
- Hutchinson, J.J., Campbell, C.A., Desjardins, R.L. (2007). Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agric. For. Meteorol.* 142, 288-302.
- IPCC (2023). Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.
- Johnston, C.M.T., Radeloff, V.C. (2019). Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116, 14526-14531.
- Junta de Andalucía (2020). Plan Forestal Andaluz Horizonte 2030. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible.
- Kongsager, R., Napier, J., Mertz, O. (2013). The carbon sequestration potential of tree crop plantations. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 18, 1197-1213.
- Lal, R. (2007). Carbon sequestration. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 815-830.
- Lara-Gómez, M.A., Navarro-Cerrillo, R.M., Ceacero, C.J., Ruiz-Gómez, F.J., Díaz-Hernández, J.L., Palacios Rodríguez, G. (2020). Use of Aerial Laser Scanning to Assess the Effect on C Sequestration of Oak (*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* [Desf.] Samp-Q. *suber* L.) Afforestation on Agricultural Land. *Geosciences* 10, 41.
- Libiad, M., Khabbach, A., El Haisoufi, M., Anestis, I., Lamchouri, F., Bourgou, S., Krigas, N. (2021). Agro-alimentary potential of the neglected and underutilized local endemic plants of Crete (Greece), Rif-Mediterranean coast of Morocco and Tunisia: Perspectives and challenges. *Plants* 10(9), 1770.
- López-Bellido, P.J., López-Bellido, L., Fernández-García, P., Muñoz-Romero, V., López-Bellido, F.J. (2016). Assessment of carbon sequestration and the carbon footprint in olive groves in Southern Spain. *Carbon Manag.* 7, 161-170.

- Montagnini, F., Nair, P.K.R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agrofor. Syst.* 61, 281–295.
- Navarro Cerrillo RM, Ceacero Ruiz, C, Lara Gómez, MA; Ruiz Gómez, F, Costes A.; Palacios Rodríguez, G. (2021). Forestación de terrenos agrícolas: plantación de pino carrasco en Huéscar (Granada) y plantación mixta de algarrobo y encina en Puerto Real (Cádiz). En Pemán García, R. M.; Navarro Cerrillo, R. M.; Prada, M. A.; Serrada Hierro, R. Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal (pp. 445-460). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Novara, A., Gristina, L., Sala, G., Galati, A., Crescimanno, M., Cerdà, A., Badalamenti, E., La Mantia, T. (2017). Agricultural land abandonment in Mediterranean environment provides ecosystem services via soil carbon sequestration. *Sci. Total, Environ.* 576, 420–429.
- Ortega Roperio, J. (2024) Secuestro de carbono en plantaciones de *Ceratonia siliqua* L. en Andalucía mediante datos LiDAR de baja densidad. Trabajo Fin de Máster GEOFOREST, Universidad de Córdoba.
- Padulosi, S., Bergamini, N., Lawrence, T. (2012). On-farm conservation of neglected and underutilized species: status, trends and novel approaches to cope with climate change: Proceedings of the International Conference Friedrichsdorf, Frankfurt, 14-16 June, 2011 (pp. xii+-293). Biodiversity International.
- Palacios-Rodríguez, G., Quinto, L., Lara-Gómez, M. A., Pérez-Romero, J., Recio, J. M., Álvarez-Romero, M., Navarro-Cerrillo, R. M. (2022). Carbon sequestration in carob (*Ceratonia siliqua* L.) plantations under the EU Afforestation Program in southern Spain using low-density aerial laser scanning (ALS) data. *Forests* 13(2), 285.
- Paul, K. I., Roxburgh, S. H., England, J. R. (2022). Sequestration of carbon in commercial plantations and farm forestry. *Trees, Forests People* 9, 100284.
- Perez-Pastor, A., Soares-Neto, J. P., de La Rosa, J. M., Tous, J., Iglesias, D. J. (2018). Characterization of the carbon assimilation of carob plantations in semi-arid conditions. In XXX International Horticultural Congress IHC2018: International Symposium on Nuts and Mediterranean Climate Fruits, Carob and X 1280 (pp. 241-246).
- Repullo-Ruiberriz de Torres, M. A., Moreno-García, M., Ordóñez-Fernández, R., Rodríguez-Lizana, A., Cárceles Rodríguez, B., García-Tejero, I. F., Carbonell-Bojollo, R. M. (2021). Cover crop contributions to improve the soil nitrogen and carbon sequestration in almond orchards (SW Spain). *Agronomy* 11(2), 387.
- Schrag, D.P., 2007. Preparing to Capture Carbon. *Science* 315, 812–813.
- Torrús-Castillo, M., Calero, J., García-Ruiz, R. (2023). Does olive cultivation sequester carbon?: Carbon balance along a C input gradient. *Agric. Ecosyst. Environ.* 358, 108707.
- Tous, J., Franquet, J.M., (2024). El algarrobo. Onada Ediciones, Barcelona.
- Trujillo García, G (2008). Biomasa de las especies forestales *Pinus halepensis* Mill., *Ceratonia siliqua* L., *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. en forestación de tierras agrarias. Aplicación al secuestro de Carbono. Trabajo Profesional Fin de Carrera, ETSIAM, Córdoba.
- Tupenaite, L., Kanapeckiene, L., Naimaviciene, J., Kaklauskas, A., Gecys, T. (2023). Timber construction as a solution to climate change: A systematic literature review. *Buildings* 13(4), 976.
- Vadell, E., Miguel, S. de, Centeno, G.F., Robla, E., Lerner, M., García, J.P. (2019). La forestación de tierras agrícolas: balance de un instrumento de política forestal para el cambio del uso de la tierra. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 45, 1–20.
- Yu, B., Zhao, Q., Wei, Y. M. (2021). Review of carbon leakage under regionally differentiated climate policies. *Sci. Total, Environ.* 782, 146765.

Agradecimientos

Este libro no habría sido posible sin la generosidad, el compromiso y el conocimiento compartido de muchas personas que, desde distintos ámbitos, han contribuido a revalorizar el algarrobo como cultivo estratégico para Andalucía. Nuestro agradecimiento más sincero es para los propietarios, viveristas y productores de algarrobo, que nos han abierto sus explotaciones y han compartido con nosotros su experiencia práctica, su tiempo y su visión. Su conocimiento directo del cultivo, adquirido a lo largo de años de trabajo en condiciones muchas veces complejas, ha sido fundamental para dar solidez y realismo a los contenidos de esta obra. Queremos reconocer de manera especial a los agricultores que han sabido conservar y transmitir el saber popular asociado al algarrobo. Gracias a ellos, este árbol ha perdurado en el paisaje y en la cultura rural andaluza, manteniendo vivas prácticas y conocimientos que hoy cobran un nuevo valor en el contexto de la sostenibilidad y la adaptación al cambio climático.

Asimismo, agradecemos a Arantxa Prada por su inestimable ayuda en la edición del libro, aportando su profesionalidad, sensibilidad y capacidad para dar forma escrita y visual a los contenidos, facilitando una lectura clara y coherente. Por último, nuestro agradecimiento a todo el equipo de UCOPress Editorial Universidad de Córdoba por su apoyo constante, su acompañamiento editorial y su apuesta por la difusión del conocimiento científico y técnico vinculado al desarrollo rural y agroforestal.

A todas las personas que, de una u otra manera, han contribuido a este trabajo, gracias por ayudarnos a construir una nueva mirada sobre el algarrobo, entendida desde su valor económico, ambiental y social para el futuro de las zonas rurales de Andalucía.

Autores

Roberto J. Cabrera-Puerto

Investigador postdoctoral, Observatorio de Bosque Mediterráneo, Grupo de Investigación ERSAF & Laboratorio Tree+ de Planta de Alta Calidad Funcional Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Cordoba 14071 (España) o12capur@uco.es.

Mohamad Ali El Chami

Investigador postdoctoral. Grupo de Investigación ERSAF & Laboratorio Tree+ de Planta de Alta Calidad Funcional. Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Cordoba 14071 (España), ep2elchm@uco.es.

Antonio Ángel García Mayoral

Técnico especialista. Grupo de Investigación ERSAF. & Laboratorio Tree+ de Planta de Alta Calidad Funcional. Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Cordoba 14071 (España) pa2gamaa@uco.es.

Jesús Jorrín Novo

Catedrático de Universidad. Dpto. de Bioquímica y Biología Molecular. E.T.S.I.A.M. Córdoba, Córdoba 14014, Edf. Severo Ochoa (C6). Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Cordoba 14071 (España), bf1jonoj@uco.es

Miguel Ángel Lara Gómez

Investigador postdoctoral, Observatorio de Bosque Mediterráneo, Grupo de Investigación ERSAF. Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Cordoba 14071 (España), g82lagom@uco.es.

Rafael M.^a Navarro Cerrillo

Catedrático. Laboratorio de dendrocronología, silvicultura y cambio climático, Grupo de Investigación ERSAF & Laboratorio Tree+ de Planta de Alta Calidad Funcional Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Córdoba 14071 (España), rmnavarro@uco.es.

M.^a Dolores Rey

Titular de Universidad. Dpto. de Bioquímica y Biología Molecular. E.T.S.I.A.M. Córdoba, Córdoba 14014, Edif. Severo Ochoa (C6). Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Córdoba 14071 (España), b52resam@uco.es

Juan Ortega Ropero

Grado en Ingeniería Forestal. Grupo de Investigación ERSAF. Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Córdoba 14071 (España), o52orroj@uco.es

Guillermo Palacios Rodríguez

Profesor Ayudante Doctor. Observatorio de Bosque Mediterráneo, Grupo de Investigación ERSAF & Laboratorio Tree+ de Planta de Alta Calidad Funcional Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Córdoba 14071 (España), gpalacios@uco.es.

Francisco J. Ruiz-Gómez

Profesor Ayudante Doctor. Laboratorio ECSIFOR, Grupo de Investigación ERSAF & Laboratorio Tree+ de Planta de Alta Calidad Funcional Departamento de Ingeniería Forestal - ETSIAM – Universidad de Córdoba, Edif. Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales s/n, Córdoba 14071 (España) ruizgomezfj@uco.es.

Este libro se terminó de imprimir en Córdoba,
en fechas cercanas al Día de Andalucía,
bajo la misma luz que ha acompañado
al algarrobo desde hace siglos.

El presente libro aborda el potencial del algarrobo (*Ceratonía siliqua* L.) como cultivo estratégico para el desarrollo sostenible y la diversificación agroforestal en Andalucía. A pesar de ser una especie tradicionalmente vinculada a zonas áridas y marginales, el algarrobo está adquiriendo un renovado interés gracias a su resistencia a la sequía, su bajo requerimiento hídrico y su capacidad para adaptarse al cambio climático. La obra analiza los avances más recientes en materia de mejora genética, técnicas de cultivo, valorización de sus productos —como la algarroba, la goma garrofín y sus derivados— y oportunidades de mercado tanto a nivel nacional como internacional. Asimismo, se presentan soluciones innovadoras orientadas a aumentar la rentabilidad y sostenibilidad del cultivo, incluyendo el uso de tecnologías de vivero y modelos de plantación de la especie. El texto combina rigor científico con una visión práctica destinada a agricultores, técnicos y responsables del sector agroforestal, promoviendo una nueva percepción del algarrobo como un cultivo de alto valor económico, ambiental y social para las zonas rurales andaluzas.

+ + +

This book explores the potential of the carob tree (*Ceratonía siliqua* L.) as a strategic crop for sustainable development and agroforestry diversification in Andalusia. Despite being a species traditionally associated with arid and marginal areas, the carob tree is gaining renewed interest thanks to its drought resistance, low water requirements, and ability to adapt to climate change. The book analyzes the latest advances in genetic improvement, cultivation techniques, the valorization of its products—such as carob pods, locust bean gum, and their derivatives—and market opportunities at both the national and international levels. It also presents innovative solutions aimed at increasing the profitability and sustainability of the crop, including the use of nursery technologies and planting models for the species. The text combines scientific rigor with a practical vision aimed at farmers, technicians and managers of the agroforestry sector, promoting a new perception of the carob tree as a crop of high economic, environmental and social value for rural areas of Andalusia.

