2025 GIJÓN | 16·20 JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-2017

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025**.
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza

DESARROLLO Y SUPERVIVENCIA DE PLÁNTULAS DE *PINUS HALEPENSIS* DE DISTINTAS PROCEDENCIAS EN CONTEXTO DE MIGRACIÓN ASISTIDA

TORNÉ SOLÀ, G. (1), FONTOVA-MUSTE, A. (1), COLL, L.L. (1,2), AMEZTEGUI, A. (1,2)

1. Universitat de Lleida
2. Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

Resumen

En un contexto de cambio climático, donde la capacidad de respuesta de muchas especies puede verse superada, resulta esencial promover su adaptabilidad. La combinación de poblaciones complementarias a la procedencia local se presenta como una estrategia prometedora para garantizar que los materiales utilizados en programas de repoblación o restauración ecológica puedan adaptarse adecuadamente a las condiciones climáticas futuras. En el marco del proyecto LIFE Adapt-Aleppo se ha creado una red de parcelas demostrativas con ensayos de procedencia a lo largo del área de distribución del pino carrasco en la Península Ibérica. Este trabajo describe el proceso de producción de planta a partir de semilla de 6 regiones de procedencia en el vivero de Ejea de los Caballeros (Zaragoza). Se presenta un análisis morfofisiológico y de crecimiento de la planta en vivero, así como se evalúa su supervivencia tras el primer verano en un ensayo de procedencia ubicado en Sant Martí de Tous (Barcelona). Los resultados muestran diferencias en el crecimiento de las plántulas entre procedencias, así como la importancia del desarrollo en altura en la supervivencia tras el primer verano. Se ofrecen así los primeros indicios de cómo diferencias genéticas entre procedencias posibilitan un uso diferencial de los recursos, influyendo en la adaptación a la sequía estival.

Palabras clave

Adaptación al cambio climático, regiones de procedencia, vivero, repoblación

1. Introducción

Según el Inventario Forestal Nacional, la superficie forestal en España ha crecido en las últimas décadas (un 30% entre 1990 y 2010), y la superficie ocupada por los pinares ibéricos de pino carrasco no es una excepción a esta tendencia general. Sin embargo, la desertificación también avanza, afectando fundamentalmente a las regiones de clima semiárido, y específicamente a la formación forestal dominada por el pino carrasco en estas condiciones bioclimáticas. Debido, por una parte, a la aridificación del clima, y por otra a los efectos de las perturbaciones antrópicas o naturales, fundamentalmente incendios forestales, algunas superficies se encuentran o transitan hacia un estado de degradación, presentando dificultades para evolucionar naturalmente hacia la formación arbolada. El estado actual de estas zonas puede variar desde suelos prácticamente desnudos y de elevada erosionabilidad, hasta matorrales mediterráneos en las etapas menos evolucionadas del pinar (Karavani et al., 2018).

En este contexto, la restauración forestal persigue la recuperación de terrenos

forestales que han sufrido algún proceso de degradación, mejorando su calidad ambiental, restableciendo sus funcionalidades y favoreciendo su evolución dinámica hacia etapas más estables y maduras ecológicamente. Aunque el concepto de restauración forestal va sin duda mucho más allá de la ejecución de plantaciones de arbolado, esta es una de las técnicas más habituales y fundamentales en restauración, sobre todo en aquellas zonas donde se desean mantener los servicios y funciones que aporta el arbolado (Martín-Alcón et al., 2022).

La práctica habitual en los proyectos de restauración y repoblación forestal ha sido la utilización de especies autóctonas y material forestal de procedencia local, asumiendo que estas estarán adaptadas a las condiciones ambientales del lugar de plantación. Sin embargo, la aridificación de las condiciones climáticas esperada en la región Mediterránea tendrá como consecuencia que las condiciones a las que se enfrentan las formaciones arboladas cambien drásticamente en pocas décadas (MedECC, 2020). En este contexto, utilizar procedencias locales no garantiza la correcta adaptación del material vegetal a las condiciones futuras (Paneghel et al., 2024), y la restauración debe plantearse la utilización de procedencias alternativas, desde la perspectiva de la migración asistida (Dalrymple et al., 2021).

La migración asistida es una estrategia de conservación que consiste en trasladar poblaciones o especies a nuevas áreas para ayudarles a adaptarse al cambio climático, mejorando su diversidad genética o facilitando su expansión hacia hábitats más favorables (Messier et al., 2019). Se han propuesto diversas aproximaciones para facilitar el flujo genético y la pre-adaptación de los bosques, asegurando la compatibilidad entre futuros genotipos y nuevos ambientes. Entre ellas, destacan: la procedencia compuesta (que refleja el flujo genético previsto entre poblaciones en un área), la mezcla de procedencias (que maximiza la diversidad de la semilla sin considerar el flujo genético), la procedencia recomendada (basada en la respuesta actual de las poblaciones al clima) y la migración asistida *sensu stricto* (que transfiere directamente las poblaciones mejor adaptadas a las condiciones futuras) (Prober et al., 2015).

Si bien es una técnica que se está aplicando de forma habitual en algunas regiones del planeta (por ejemplo, en la Columbia Británica, en Canadá), en el contexto del bosque Mediterráneo, la migración asistida se ha aplicado hasta el momento de forma experimental, y aún falta acumular un mayor conocimiento sobre la respuesta de diferentes regiones de procedencia a las condiciones climáticas en un contexto de cambio climático. La aceleración del cambio climático en la región hace cada vez más urgente la adquisición del conocimiento necesario para valorar su implementación práctica como una medida fundamental de gestión forestal para la adaptación (Martín-Alcón et al., 2022).

Este es precisamente uno de los objetivos del proyecto LIFE ADAPT ALEPPO: establecer un conjunto de rodales demostrativos en los que se implementarán actuaciones de restauración forestal bajo un criterio de migración asistida, utilizando, además de procedencias locales, un conjunto de procedencias a priori mejor adaptadas a las condiciones climáticas futuras (ver Ameztegui et al., 2025 en este mismo congreso). En el presente trabajo se presentan precisamente los datos de uno de los rodales demostrativos implementados en el marco del proyecto, así como los resultados relativos a la adaptación a corto plazo de cada una de las procedencias.

2. Objetivos

El estudio tiene como objetivo principal implementar y evaluar la eficacia de un ensayo de migración asistida en el que se utiliza material forestal de reproducción de diversas regiones de procedencias. Los objetivos específicos son:

- Diseñar e implementar el ensayo experimental con regiones de procedencia locales y procedencias adaptadas al clima futuro según diversos escenarios de cambio climático.
- Analizar el crecimiento en vivero, características funcionales y contenido de nitrógeno foliar de las plantas de las diferentes regiones de procedencia.
- Evaluar la supervivencia en campo después del primer verano de la plantación.

3. Metodología3.1 Área de estudio

El área seleccionada para el estudio se sitúa en la distribución natural de Pinus halepensis en Cataluña, específicamente en una zona afectada por el incendio forestal de Santa Coloma de Queralt en 2021, que quemó 1.823,9 hectáreas, de las cuales 1.388,84 ha eran vegetación forestal. Antes del incendio, predominaban bosques de *Pinus halepensis*, rodales de *P. nigra*, sotobosque mediterráneo y ejemplares dispersos de *Quercus faginea* y *Q. ilex*.

El ensayo de migración asistida se ha establecido en la finca privada de Can Gol, en Sant Martí de Tous, al suroeste de la comarca de la Anoia, en el área donde se logró frenar el avance del incendio (Figura 1). La zona presenta condiciones adecuadas para el estudio debido a su regeneración natural heterogénea, una pendiente moderada y la posibilidad de mecanizar los trabajos. Geográficamente, combina depresiones (400 m s.n.m.) y sierras de la cordillera de Miralles-Queralt (600-700 m s.n.m.), con la riera de Tous como principal curso hidrográfico.

El área de estudio tiene un clima mediterráneo, con inviernos suaves y veranos cálidos y secos. La temperatura media anual es de 13,2°C y la precipitación anual alcanza los 572 mm, concentrándose en otoño (octubre-noviembre) y primavera (marzo-abril). Julio es el mes más seco y cálido.

Geológicamente, el terreno está formado por materiales sedimentarios del Mioceno, como margas, arcillas y areniscas, con depósitos detríticos en las zonas elevadas. Los suelos predominantes incluyen calcimorfos sobre margas calcáreas, suelos arcillosos con problemas de drenaje y suelos aluviales más fértiles en áreas cercanas a los cursos de agua. Estos suelos, de pH moderadamente alcalino, permiten cultivos de secano como cereales, viña y olivos, destacando la mayor fertilidad en las zonas aluviales.

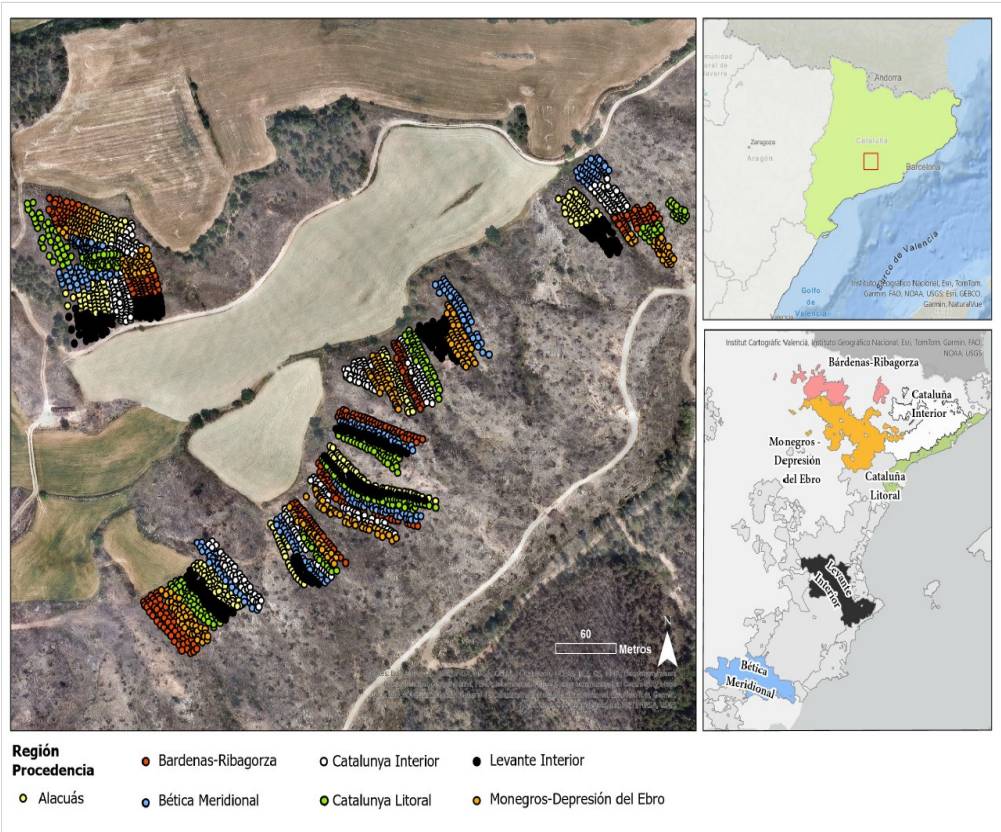

Figura1:*Mapa de la ubicación de la finca de Can Gol, en Sant Martí de Tous, Cataluña, que muestra las plantaciones de Pinus halepensis de diversas regiones de procedencia (ver leyenda). Se incluye también el mapa de las regiones de procedencia de Pinus halepensis en España.*

3.2 Elección de regiones de procedencia para la plantación

El proyecto Life Adapt-Aleppo tiene como objetivo realizar pruebas de migración asistida, seleccionando para cada parcela seis procedencias: dos locales, dos adaptadas a escenarios de emisiones futuras moderados y dos a escenarios futuros severos. Para seleccionar las procedencias, se llevó a cabo un análisis fitoclimático de la zona de plantación utilizando los indicadores definidos por Allue et al., (1990) a partir de datos climáticos actuales y futuros obtenidos a través de la herramienta WorldClim y modelos específicos para escenarios moderados (ssp245) y severos (ssp585) del modelo CMCC-ESM2 (Figura 2). Las variables consideradas incluyeron temperaturas mínima, máxima y media mensual, así como precipitaciones mensuales. Con esta información se calcularon una serie de variables fitoclimáticas del área de plantación en la actualidad y para cada uno de los escenarios futuros, los cuales se compararon con las características climáticas de cada una de las regiones de procedencia de *Pinus halepensis* en España, identificando las más similares. Los detalles sobre la metodología de selección de regiones de procedencia pueden encontrarse en un trabajo presentado en el presente congreso (Ameztegui et al., 2025).

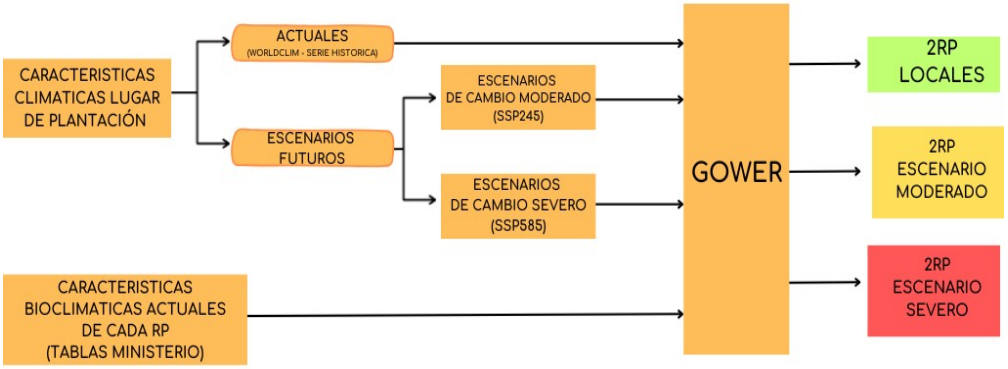

Figura 2: Diagrama con los pasos de la homologación fitoclimática realizada para determinar las regiones de procedencia a utilizar.

Las procedencias seleccionadas fueron: Cataluña interior y Cataluña litoral como procedencias locales; Bárdenas-Ribagorza y Levante Interior para el escenario moderado; y Monegros-Depresión del Ebro y Bética Meridional para el escenario severo (Figura 1).

Adicionalmente, se incluyó material del rodal "Alacuás" debido a su destacado comportamiento en estudios previos (REFERENCIAS?). A diferencia del resto de MFR utilizado, el material de Alacuás no proviene de una única región de procedencia, sino que es una mezcla de las regiones de Maestrazgo-Los Serranos, Levante Interior y Litoral Levantino. Además, se trata de material de categoría cualificada, a diferencia del resto, que es de categoría identificada. Por estas razones, se espera que el MFR de Alacuás presente un comportamiento superior al de las plántulas provenientes de material de categoría identificada.

3.3 Producción de planta en vivero

Debido a la falta de disponibilidad de planta de algunas regiones de procedencia necesarias, se decidió producirla toda en vivero a partir de semillas proporcionadas por Forestal Catalana y el Ministerio para la Transición Ecológica. Las semillas, provenientes de las regiones seleccionadas y catalogadas como material forestal de reproducción identificado (etiqueta amarilla), fueron sembradas en marzo de 2023 en el Vivero Forestal de la Diputación General de Aragón, en Ejea de los Caballeros (Zaragoza).

Se sembraron tres semillas por alvéolo de 250 cm^3 utilizando un sustrato compuesto por un 70% de turba y un 30% de arcilla de masas de *Pinus halepensis* de la zona de las Bardenas, siguiendo la práctica habitual de este vivero. La turba

utilizada, de baja calidad y sin fertilizante añadido, buscaba minimizar el riesgo de proliferación de hongos (J. Cosculluela, comunicación personal).

3.4 Evaluación de la planta producida en vivero

Un año después de la siembra se evaluaron las plantas producidas mediante una submuestra aleatoria de 48 plántulas (una bandeja por cada región de procedencia). Se midieron la altura de la plántula y su diámetro en el cuello de la raíz para verificar el cumplimiento de los requisitos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Además, se analizaron:

- **Esbeltez**: relación entre altura total y diámetro del cuello de la raíz.
- **Relación peso aéreo/peso radicular**: Se analizaron diferencias en el desarrollo radicular y aéreo entre procedencias desenterrando las plántulas, limpiando las raíces y separando las partes aérea y radicular por el cuello de raíz. El material vegetal se secó a 50°C durante 48 horas y se pesó por separado.
- **Concentración de nitrógeno foliar**: Se analizaron muestras de acículas de 9 plántulas aleatorias por cada región de procedencia con un molino de bolas y un Analizador Elemental Flash 2000 para determinar el porcentaje de nitrógeno en hojas, una variable que ha mostrado relación con el crecimiento y supervivencia post-plantación.

3.5 Diseño del ensayo de migración asistida

Se plantaron 800 pies por hectárea siguiendo un diseño de bloques completos al azar. El diseño incluyó 8 bloques (0,5 ha cada uno), distribuidos aleatoriamente según la pendiente del terreno para capturar la variabilidad ambiental (Figura 1).

En cada uno de los bloques se incluyeron 7 parcelas; en cada parcela, el número de individuos fue de aproximadamente 48 pinos, correspondientes a una bandeja y a una región de procedencia, y alrededor de 10 ejemplares de especies acompañantes como *Quercus ilex, Q. faginea y Acer monspessulanum*, propias del cortejo florístico de la zona de estudio. En total, se utilizaron 2.688 plántulas de pino, con un promedio de 336 por cada región de procedencia. Cada parcela (con 48 pinos y 10 individuos de especies acompañantes) fue marcada con estacas y cintas para asegurar la trazabilidad de las plántulas.

3.6 Preparación del terreno y plantación

Una vez realizado el diseño de la plantación y producida la planta, el ahoyado se realizó mediante retroexcavadora, debido a que la elevada pedregosidad del área de estudio recomendaba una actuación puntual. A finales de enero de 2024 se abrieron agujeros de 60x60x60 cm con una pala de retroexcavadora, a una distancia aproximada entre hoyos de 3,5 metros. El suelo extraído por la pala se volvió a arrojar en el hoyo sin voltearlo, buscando mejorar la retención de agua y descompactar el suelo para favorecer el desarrollo radicular. La plantación se realizó mediante ahoyado manual con azada, en febrero de 2024, para evitar en lo posible el riesgo de heladas fuertes y poder aprovechar las primeras lluvias de primavera. Se priorizó el uso de plantas con altura mínima de 8 cm, aunque también se utilizaron plantas más pequeñas debido a limitaciones de disponibilidad (ver resultados).

3.7 Seguimiento de la plantación y supervivencia

Inmediatamente tras la plantación, cada plántula fue geolocalizada con precisión centimétrica y etiquetada, y se midió su altura hasta la yema apical con una regla.

Se evaluó la supervivencia de cada una de las 2600 plántulas en junio (4 meses después de la plantación), para evaluar los efectos del estrés de plantación; y en octubre (después del primer verano). Se plantea un seguimiento cada 6 meses (otoño y primavera) durante los próximos años para poder identificar la mortalidad estival e hibernal de cada una de las procedencias.

3.8 Análisis estadístico

En el análisis estadístico de los datos se empleó principalmente análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias en los parámetros de crecimiento (altura, diámetro, esbeltez, alocación de biomasa a raíces y contenido de N foliar) entre las diferentes regiones de procedencia de las plántulas. Este análisis se complementó con la prueba de Tukey para realizar comparaciones post-hoc entre las medias de las regiones y determinar cuáles eran significativamente diferentes entre ellas.

4. **Resultados4.1 Caracterización del crecimiento en viveroCrecimiento en altura**

Aunque la mayoría de las plántulas superaron la altura mínima para la comercialización (establecida en 8 cm), todas las regiones presentaron ejemplares por debajo del límite, siendo Monegros-Depresión del Ebro la procedencia más destacada en este aspecto (Figura 3). Además, dentro de cada región existe una variabilidad considerable en alturas, con diferencias de hasta 20 cm entre individuos a pesar de que las condiciones de cultivo fueron las mismas para todas las plantas y procedencias.

El análisis ANOVA mostró diferencias significativas en la altura de las plántulas según la región de procedencia ($Pr(>F) < 2e-16$). En efecto, las alturas medianas variaron considerablemente entre procedencias: Bardenas Ribagorza y Monegros Depresión del Ebro presentaron los valores más bajos, mientras que el rodal de Alacuás, Levante Interior y Bética Meridional presentaron las más altas. Las procedencias locales se sitúan en posiciones intermedias, siendo Cataluña Litoral más cercana a los valores altos y Cataluña Interior similar a las regiones de menor altura. Sin embargo, no se observa una gradación clara en función del tipo de procedencia (locales - clima moderado - severo).

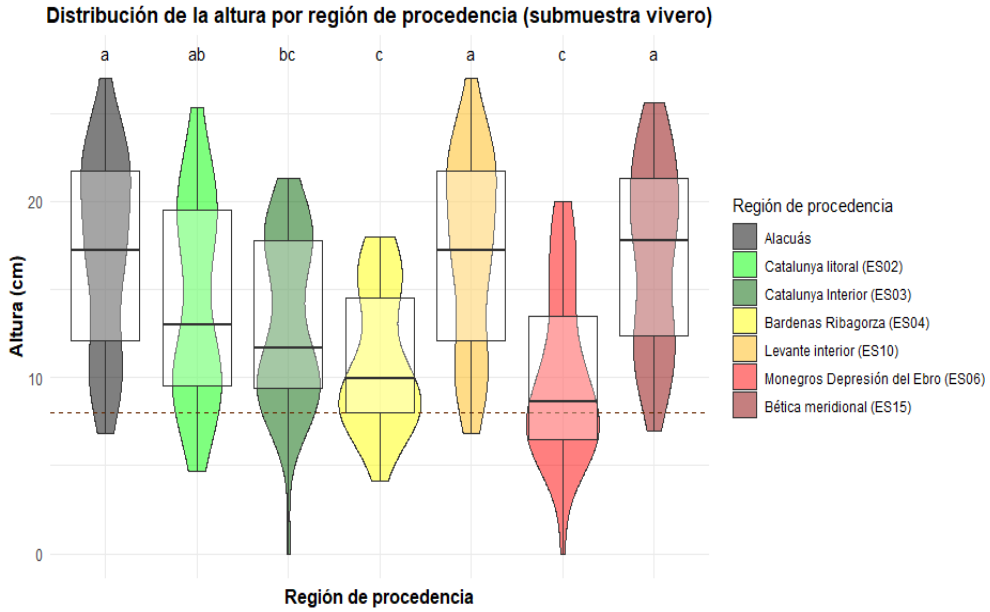

Figura 3: Distribución de la altura (cm) por región de procedencia de la submuestra de plantas analizadas en el vivero (n=48 por cada región de procedencia). La línea roja discontinua indica la altura mínima comercializable según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (8 cm). Las procedencias con la misma letra no presentan diferencias significativas entre ellas en la distribución de las alturas. En tonalidades verdes se muestran las procedencias locales, en tonalidades amarillas las del escenario de cambio climático moderado, y en tonalidades rojas las del escenario de cambio climático severo.

Crecimiento en diámetro

En cuanto al diámetro, las regiones Bardenas-Ribagorza y Monegros-Depresión del Ebro presentaron valores significativamente menores en comparación con el rodal de Alacuás y Levante Interior, mientras quelas demás regiones no presentaron diferencias significativas (Figura 4). Cabe destacar que se observó menor variabilidad entre plantas en diámetro que en altura, aunque las regiones con mayor altura (Alacuás, Levante Interior y Bética Meridional) también tenían diámetros mayores. Sin embargo, solo las medianas de Alacuás y Levante Interior superaron el diámetro mínimo comercializable (2 mm), destacando nuevamente Monegros por sus valores más bajos.

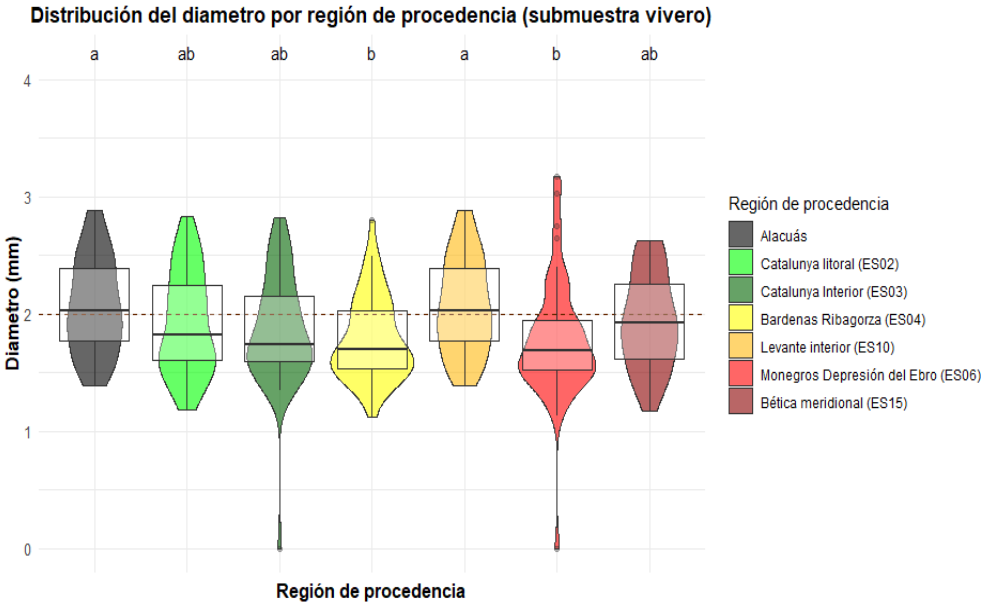

Figura 4: Distribución del diámetro (mm) por región de procedencia de la submuestra de plantas analizadas en el vivero (n=48 por cada región de procedencia). La línea roja discontinua indica el diámetro mínimo comercializable según el Ministerio (2 mm). Las procedencias con la misma letra indican que no hay diferencias significativas entre ellas en la distribución de los diámetros. En tonalidades verdes se muestran las procedencias locales, en tonalidades amarillas las del escenario de cambio climático moderado, y en tonalidades rojas las del escenario de cambio climático severo.

Basándose en la relación altura/diámetro, se identificaron tres grupos: (i) procedencias mayor esbeltez (Alacuás, Bética Meridional, Levante Interior); (ii) procedencias de esbeltez baja (Monegros Depresión del Ebro, Bardenas Ribagorza), y (iii) procedencias de esbeltez intermedia (Cataluña Interior, Cataluña Litoral) (Figura 5). En este sentido, destaca que las procedencias de mayor esbeltez tenían orígenes más meridionales. No obstante, la alta variabilidad dentro de cada grupo dificulta identificar diferencias significativas consistentes, y estos grupos no coinciden de manera clara con los tres tipos de procedencias según su proximidad a los escenarios climáticos (locales, clima moderado, clima severo).

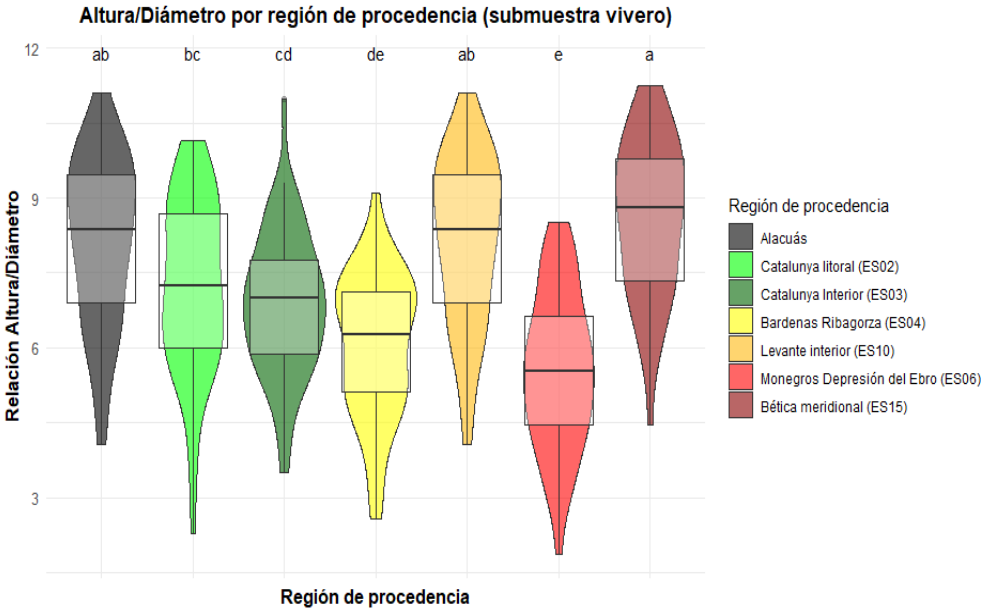

Figura 5: Distribución de la relación entre altura y diámetro por región de procedencia de la submuestra del vivero (n=48 por región de procedencia). Las procedencias con la misma letra indican que no hay diferencias significativas entre ellas en la relación altura-diámetro. En tonalidades verdes se muestran las procedencias locales, en tonalidades amarillas las del escenario de cambio climático moderado, y en tonalidades rojas las del escenario de cambio climático severo.

Relación entre peso aéreo y peso radicular

Todas las regiones mostraron una proporción de peso aéreo superior al radicular, con valores promedio cercanos a 2:1 (Figura 6). La región de procedencia "Monegros Depresión del Ebro", además de tener menor peso aéreo en valor absoluto, coincidía con un desarrollo inferior en altura, como se ha indicado anteriormente. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre regiones para esta relación (p = 0.1754).

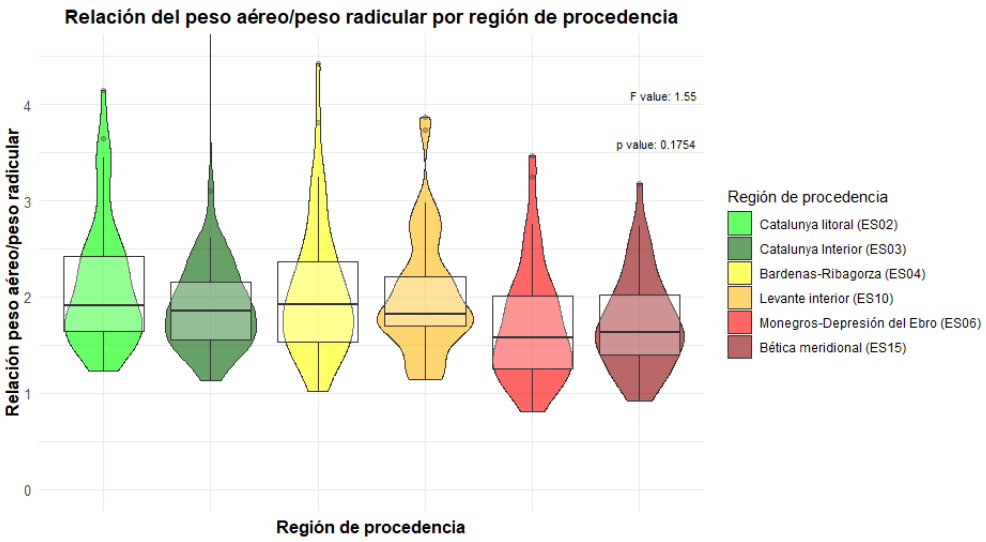

Figura 6: Distribución de la relación entre el peso aéreo y el peso radicular por región de procedencia (n=48 por región de procedencia). El valor p indica el nivel de

significación. En tonalidades verdes se muestran las procedencias locales, en tonalidades amarillas las del escenario de cambio climático moderado, y en tonalidades rojas las del escenario de cambio climático severo.

Contenido de nitrógeno foliar

El contenido de nitrógeno foliar varió significativamente entre regiones. Levante Interior y Bética Meridional presentaron las concentraciones más altas, asociadas con su mayor desarrollo aéreo (Figura 7). Sin embargo, no se observó una correlación clara a nivel global entre el contenido de nitrógeno y la altura de las plántulas (datos no mostrados). Aunque dentro de cada región de procedencia los valores obtenidos son similares, no se puede afirmar una relación consistente, probablemente debido al tamaño reducido de la muestra analizada (9 plántulas por región).

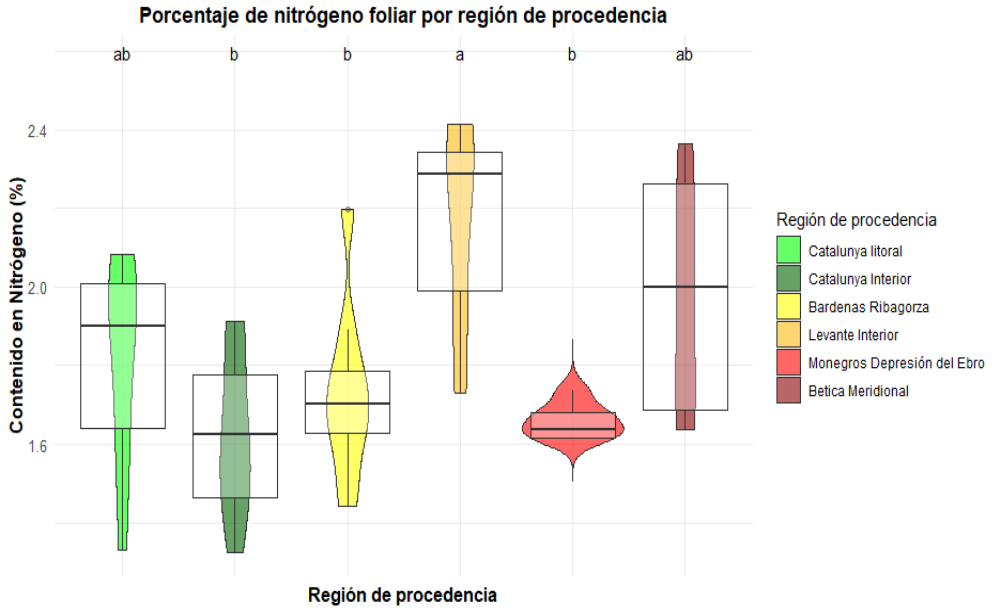

Figura 7: Contenido de nitrógeno foliar (%) por región de procedencia (n=9). Las procedencias con la misma letra indican que no hay diferencias significativas entre ellas en el contenido de nitrógeno foliar. En tonalidades verdes se muestran las procedencias locales, en tonalidades amarillas las del escenario de cambio climático moderado, y en tonalidades rojas las del escenario de cambio climático severo.

4.2 Supervivencia de la planta

La supervivencia se analizó en dos momentos clave: junio y octubre de 2024. Cabe destacar que las tasas de supervivencia en junio reflejan las plántulas que lograron superar el estrés inicial asociado al trasplante, marcando su incorporación efectiva al experimento de migración asistida. Por otro lado, los datos de octubre muestran la mortalidad ocurrida después de enfrentar las condiciones ambientales del primer verano.

En junio de 2024, la supervivencia fue relativamente alta, con valores que oscilaron entre el 78,7 % y el 86,5 %. Esto indica que la mayoría de las plántulas lograron superar el estrés inicial del trasplante, caracterizado por factores como el

establecimiento radicular y la adaptación al nuevo entorno, a pesar del escaso tamaño de algunas de las plantas utilizadas. Las regiones con las tasas de supervivencia más altas fueron Bética Meridional y Monegros-Depresión del Ebro, precisamente las que presentan un rango climático más parecido al esperado para el escenario de cambio climático severo (Figura 8), así como el rodal de Alacuás. Por otro lado, los valores más bajos de supervivencia se obtuvieron para Cataluña Interior y Levante Interior.

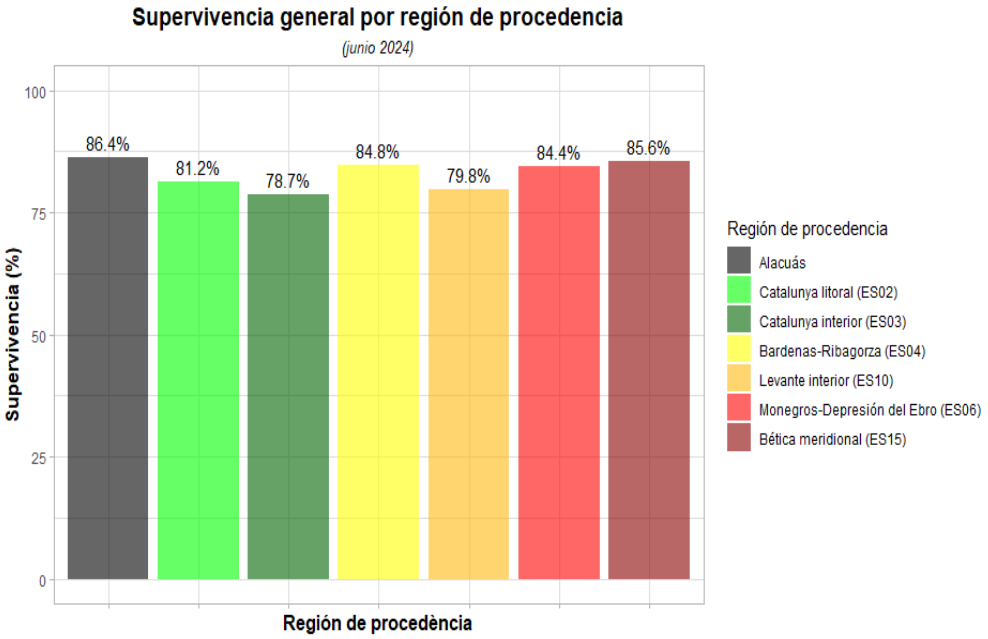

Figura 8: Supervivencia en junio de 2024 por regiones de procedencia. En tonalidades verdes se muestran las procedencias locales, en tonalidades amarillas las del escenario de cambio climático moderado, y en tonalidades rojas las del escenario de cambio climático severo.

En octubre de 2024, las tasas de supervivencia disminuyeron significativamente, reflejando la mortalidad sufrida tras el primer verano, un periodo caracterizado por condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas. La supervivencia en este punto varió entre el 55,5 % y el 62,7 %. Las regiones con mayor supervivencia fueron Monegros y Levante Interior, así como el rodal de Alacuás (Figura 9), mientras que Cataluña litoral y Bética meridional presentaron las menores tasas de supervivencia, por debajo del 60%.

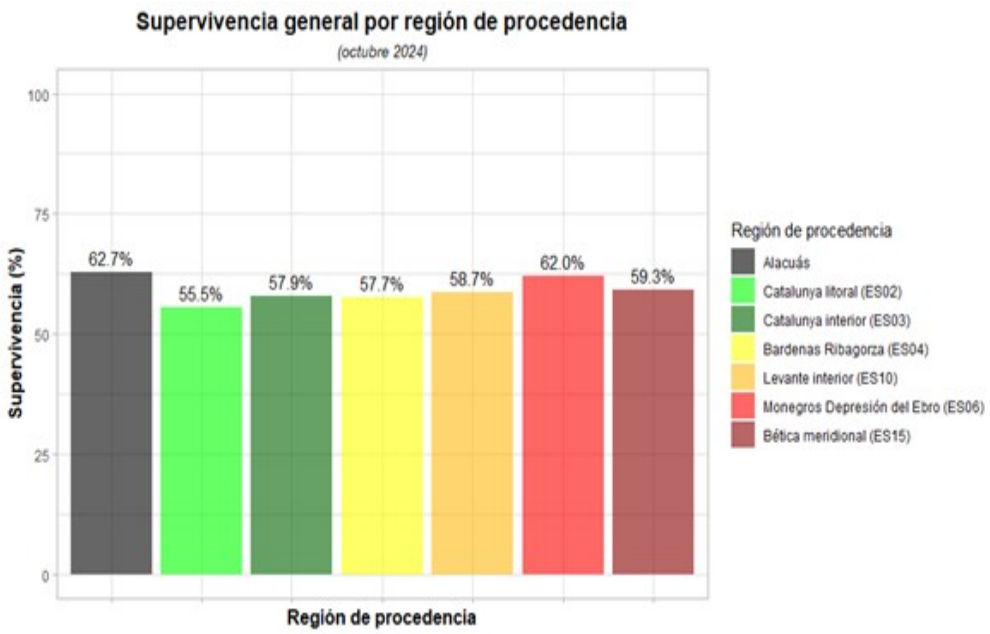

Figura 9: Supervivencia en octubre de 2024 por regiones de procedencia. En tonalidades verdes se muestran las procedencias locales, en tonalidades amarillas las del escenario de cambio climático moderado, y en tonalidades rojas las del escenario de cambio climático severo.

El análisis comparativo entre los dos periodos evidencia una marcada disminución en la supervivencia promedio. Por ejemplo, el rodal de Alacuás pasó de un 86,4 % en junio a un 62,7 % en octubre (reducción del 23,7 %); mientras que Catalunya litoral (ES02) mostró una caída del 81,2 % al 55,5 % (reducción del 25,7 %). Estos datos destacan que las plántulas que superaron el estrés inicial de plantación (evaluado en junio) no necesariamente mantuvieron su viabilidad tras el periodo de mayor estrés climático. A pesar de la reducción general en la supervivencia, las plántulas de procedencias de climas áridos o cálidos parecen haber conferido cierta ventaja en términos de supervivencia relativa tras el verano, mostrando una mayor resiliencia frente a las condiciones ambientales adversas del verano.

5. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio arrojan luz sobre la eficacia de la migración asistida como herramienta para la restauración forestal en contextos de cambio climático. A continuación, se analizan las implicaciones de los principales hallazgos:

5.1 Crecimiento en vivero y características funcionales

Las diferencias significativas en altura, diámetro y contenido de nitrógeno foliar entre las distintas procedencias evidencian la influencia de factores genéticos y condiciones climáticas de origen en el desarrollo de las plántulas. Sin embargo, el presente estudio no identificó correlaciones claras entre estas características y la supervivencia a largo plazo, salvo en el caso de la altura. Este hallazgo es consistente con lo señalado por Del Campo et al. (2022), quienes destacaron que los estándares tradicionales de calidad en vivero, basados en promedios de atributos como altura o peso seco, suelen tener una capacidad predictiva limitada para la supervivencia y adaptación a largo plazo bajo condiciones de estrés hídrico

extremo.

Adicionalmente, Voltas (2023) resalta que la capacidad de las plántulas para responder a condiciones ambientales variables no se explica únicamente por atributos individuales, sino por un complejo entramado de rasgos adaptativos, llevando en ocasiones a respuesta no esperadas o contraintuitivas (Patsiou et al., 2020). Este concepto implica la interacción funcional entre rasgos, como la inversión en biomasa aérea y radicular, y su variación plástica frente a cambios ambientales (Hevia et al., 2020). Los resultados de este estudio, que muestran proporciones consistentes de peso aéreo-radicular y diferencias en la relación altura/diámetro según la procedencia, pueden interpretarse como manifestaciones de esta complejidad, si bien sería recomendable evaluar dicha plasticidad a las plántulas instaladas en el dispositivo experimental, para detectar interacciones genética-ambiente.

Prober et al. (2015) refuerzan esta perspectiva al enfatizar que estrategias como el "climate-adjusted provenancing" deben incorporar genotipos que no solo maximicen el rendimiento bajo condiciones actuales, sino que también posean adaptaciones preexistentes a climas proyectados. Esto puede incluir atributos que promuevan la eficiencia en el uso del agua y la resiliencia frente a condiciones extremas, lo que resulta particularmente relevante en el caso de las procedencias de climas áridos como Monegros-Depresión del Ebro. Además, esta aproximación rehúye la elección de una única procedencia “óptima”, precisamente para evitar respuestas inesperadas que puedan comprometer el éxito de la restauración.

Además, Del Campo et al. (2022) argumentan que los atributos individuales, como el crecimiento temprano en campo, son predictores más robustos del éxito en la reforestación. Por ello, el presente estudio refuerza la necesidad de incorporar métricas más específicas y basadas en rasgos individuales a los programas de evaluación en vivero, especialmente en regiones vulnerables al cambio climático.

5.2 Supervivencia y adaptación al estrés

La alta supervivencia inicial (junio 2024) indica que las técnicas de preparación del terreno, selección de plántulas y manejo del vivero fueron adecuadas para mitigar el estrés de plantación, que se esperaba alto por las dimensiones reducidas de la planta. Sin embargo, la marcada reducción en la supervivencia tras el primer verano destaca el impacto del estrés hídrico y las altas temperaturas, típicas de la región mediterránea. Procedencias como Monegros-Depresión del Ebro y el rodal de Alacuás, provenientes de climas más áridos que el del lugar de plantación, mostraron una mayor resiliencia a corto plazo, lo que en un futuro puede respaldar su inclusión en futuros programas de migración asistida en áreas vulnerables al cambio climático.

Sin embargo, es imprescindible evaluar las respuesta de las diferentes procedencias a más largo plazo. Voltas (2023) subraya que la supervivencia a largo plazo no solo depende de las condiciones iniciales de establecimiento, sino también de la capacidad adaptativa de las plántulas para enfrentar eventos climáticos extremos. Así, más allá de las diferencias genéticas “basales” en supervivencia, algunas regiones de procedencia han mostrado en el pasado mayor “plasticidad” de supervivencia, es decir, mayor variación de su capacidad de supervivencia en función del (Voltas et al., 2018). Este autor argumenta que los programas de restauración deberían incorporar no solo técnicas operativas, como el manejo del

riego o el acondicionamiento del terreno, sino también enfoques genéticos que incluyan la selección de genotipos con síndromes adaptativos específicos, capaces de maximizar la resiliencia frente al estrés hídrico y térmico.

5.3 Aplicación y desafíos de la migración asistida

Nuestro estudio proporciona evidencias preliminares de que la migración asistida puede ser una estrategia para la restauración forestal en condiciones climáticas futuras. Sin embargo, su implementación práctica enfrenta desafíos operativos, como la logística de la producción de planta de procedencias específicas, y éticos, relacionados con la introducción de material genético no local (Aubin et al., 2011). Además, la alta mortalidad en las primeras etapas abre la puerta a la necesidad de asegurar la calidad de planta utilizada a través de métricas específicas (del Campo et al., 2022) y a complementar esta estrategia con otras prácticas de manejo como el riego de emergencia o la mejora del suelo (del Campo et al., 2021).

Prober et al. (2015) defienden maximizar la diversidad genética en la migración asistida para aumentar las probabilidades de adaptación bajo condiciones futuras inciertas, especialmente en ecosistemas heterogéneos. En contraste, Voltas (2023) defiende que otra aproximación posible sería priorizar características funcionales específicas, como la tolerancia a la sequía, para enfrentar el estrés climático extremo, una estrategia relevante en regiones mediterráneas. En esta plantación, las plántulas de Monegros-Depresión del Ebro y Alacuás, procedentes de ambientes más secos, demostraron mayor capacidad de supervivencia frente al estrés hídrico. Sin embargo, la alta variabilidad observada sugiere que la diversidad genética intraprocedencias también puede desempeñar un papel clave, como plantea Prober et al. (2015). Esto deja abierto el debate sobre si es mejor diversificar genéticamente o enfocarse en adaptaciones específicas según las características del sitio y el grado de estrés ambiental, lo cual requeriría ampliar el conocimiento sobre las respuestas de cada procedencia en un gradiente de condiciones ambientales. En ese sentido, las redes de dispositivos experimentales como las establecidas en el marco del proyecto Life Adapt-Aleppo pueden convertirse en una herramienta fundamental para la toma de decisiones que maximicen el éxito de las repoblaciones forestales

5.4 Limitaciones operativas y replicabilidad

Uno de los desafíos clave identificados durante este estudio fue la imposibilidad de realizar la plantación en el momento originalmente planificado debido a la falta de disponibilidad de semillas, lo que retrasó el proceso un año. Este hecho subraya la importancia de considerar las limitaciones operativas al diseñar estrategias de restauración forestal. La necesidad de producir plántulas específicas para un programa de migración asistida no siempre se alinea con los plazos inmediatos de ejecución, especialmente si el material genético deseado no está disponible en viveros públicos o locales.

6. Conclusiones

Este estudio destaca el potencial de las procedencias adaptadas a climas áridos, como Monegros-Depresión del Ebro y Alacuás, para su uso en programas de migración asistida. Estas procedencias mostraron un buen desempeño tanto en el

vivero como en el campo, especialmente en términos de supervivencia tras el primer verano, lo que subraya su capacidad de resiliencia frente al estrés climático en contextos mediterráneos. Sin embargo, la marcada reducción en la supervivencia en todas las procedencias durante el verano pone de manifiesto la necesidad de combinar esta estrategia con prácticas de manejo adaptativo, como el riego de emergencia o la mejora del suelo, para maximizar el éxito inicial.

La variabilidad observada entre procedencias refuerza la importancia de seleccionar material genético diverso, adaptado tanto a escenarios climáticos futuros como a las condiciones específicas del sitio de plantación. Este enfoque requiere integrar herramientas genómicas y fenotípicas con un monitoreo a largo plazo para evaluar la efectividad y sostenibilidad de estas estrategias en condiciones reales de cambio climático.

Finalmente, aunque los resultados son preliminares, este trabajo representa un primer paso hacia la implementación práctica de la migración asistida en ecosistemas forestales mediterráneos. Su éxito dependerá de un esfuerzo conjunto entre investigadores, gestores y legisladores para abordar los desafíos operativos, éticos y científicos que plantea esta estrategia, y garantizar así su contribución efectiva a la restauración de ecosistemas forestales degradados.

7. Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto Life Adapt-Aleppo (LIFE20CCA/ES001809) y por la Agencia Catalana de Investigación (AGAUR), mediante la financiación al Grupo de Investigación Consolidado ADAPTAFOR. Agradecemos también a Josep Gual, propietario del terreno, por su generosa cesión, lo que ha facilitado la ejecución de este trabajo en un entorno único. Los autores también agradecen a Forestal Catalana y el Ministerio para la Transición Ecológica la cesión de las semillas, y al vivero de Ejea de los Caballeros, y en especial a Jesús Cosculluela, por su disponibilidad para producir la planta. Finalmente, extendemos nuestro reconocimiento a la Diputación de Barcelona y al Ayuntamiento de Sant Martí de Tous por su apoyo institucional para llevar a cabo esta iniciativa.

También queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a los miembros del grupo de investigación Adaptafor de la Universidad de Lleida (UdL) y a todos los socios del proyecto LIFE ADAPT ALEPPO, cuyo compromiso, dedicación y colaboración han sido fundamentales para la realización de este proyecto.

8. Bibliografía

Allue, A., José Luis, M., & Angel, J. (1990). *Atlas fitoclimático de España : taxonomías*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (España), ed.

Aubin, I., Garbe, C. M., Colombo, S., Drever, C. R., McKenney, D. W., Messier, C., Pedlar, J., Saner, M. A., Venier, L., Wellstead, A. M., Winder, R., Witten, E., & Ste-Marie, C. (2011). Why we disagree about assisted migration: Ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests. *Forestry Chronicle*, *87*(6). https://doi.org/10.5558/tfc2011-092

Dalrymple, S. E., Winder, R., & Campbell, E. M. (2021). Exploring the potential for plant translocations to adapt to a warming world. In *Journal of Ecology* (Vol. 109, Issue 6). https://doi.org/10.1111/1365-2745.13715

del Campo, A. D., Segura-Orenga, G., Bautista, I., Ceacero, C. J., González-Sanchis, M., Molina, A. J., & Hermoso, J. (2021). Assessing reforestation failure at the project scale: The margin for technical improvement under harsh conditions. A case study in a Mediterranean Dryland. *Science of the Total Environment*, *796*.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148952
del Campo, A. D., Segura-Orenga, G., Molina, A. J., González-Sanchis, M., Reyna, S., Hermoso, J., & Ceacero, C. J. (2022). On the need to further refine stock quality specifications to improve reforestation under climatic extremes. *Forests*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/f13020168
Hevia, A., Campelo, F., Chambel, R., Vieira, J., Alía, R., Majada, J., & Sánchez-Salguero, R. (2020). ***Which matters more for wood traits in Pinus halepensis Mill., provenance or climate?*** https://doi.org/10.1007/s13595-020-00956-y/Published
Karavani, A., Boer, M. M., Baudena, M., Colinas, C., Díaz-Sierra, R., Pemán, J., de Luis, M., Enríquez-de-Salamanca, Á., & Resco de Dios, V. (2018). Fire-induced deforestation in drought-prone Mediterranean forests: drivers and unknowns from leaves to communities. In *Ecological Monographs* (Vol. 88, Issue 2). https://doi.org/10.1002/ecm.1285
Martín-Alcón, S., Tomé Morán, J.L., Jordán González, E., Vicente Valero, L., Chamón Fernández, M., Coll Mir, L., Ameztegui González, A., del Campo García, A.D., González Sanchís, M., Moya, D., De Las Heras, J. (2022). Proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO: selvicultura para la adaptación de los pinares mediterráneos al cambio climático. Actas del 8 Congreso Forestal Español https://adaptaleppo.eu/wp-content/uploads/2023/08/8CFE-937_LIFE-Adaptaleppo.pdf
MedECC. (2020). Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin - Current Situation and Risks for the Future, First Mediterranean Assessmnet Report. In *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report.*
Messier, C., Bauhus, J., Doyon, F., Maure, F., Sousa-Silva, R., Nolet, P., Mina, M., Aquilué, N., Fortin, M. J., & Puettmann, K. (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, *6*(1). https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2
Paneghel, M., Torné i Solà, G., Morin, X., G. Alday, J., & Coll, L. (2024). Increasing temperature threatens post-fire auto-successional dynamics of a Mediterranean obligate seeder. *Journal of Ecology*. http://dx.doi.org/10.1111/1365-2745.14433
Patsiou, T. S., Shestakova, T. A., Klein, T., di Matteo, G., Sbay, H., Chambel, M. R., Zas, R., & Voltas, J. (2020). Intraspecific responses to climate reveal nonintuitive warming impacts on a widespread thermophilic conifer. *New Phytologist*, *228*(2), 525–540. https://doi.org/10.1111/nph.16656
Prober, S. M., Byrne, M., McLean, E. H., Steane, D. A., Potts, B. M., Vaillancourt, R. E., & Stock, W. D. (2015). Climate-adjusted provenancing: A strategy for climate-resilient ecological restoration. In *Frontiers in Ecology and Evolution* (Vol. 3, Issue JUN). https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00065
Voltas, J. (2023). Tres siglos de Genética Forestal: situación actual, retos e incertidumbres Three centuries of Forest Genetics: current situation, challenges and uncertainties Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales Conferencias y Ponencias del 8º Congreso Forestal Español. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For*, *49*(2), 101–116. https://doi.org/10.31167/csef.v0i49.19939
Voltas, J., Shestakova, T. A., Patsiou, T., di Matteo, G., & Klein, T. (2018). Ecotypic variation and stability in growth performance of the thermophilic conifer *Pinus halepensis* across the Mediterranean basin. *Forest Ecology and Management*, *424*, 205–215. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.058