



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-288

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

El uso de plantas de mayor tamaño en repoblaciones forestales aumenta la supervivencia y crecimiento en áreas mediterráneas

ANDIVIA, E.¹, CRUZ, J.¹, OLIET, J.A.², PUÉRTOLAS, J.³ y VILLAR-SALVADOR, P.¹

¹ Forest Ecology and Restoration group. Departamento de Ciencias de la Vida. Universidad de Alcalá.

² Departamento de Sistemas y Recursos Naturales, E.T.S. Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.

³ The Lancaster Environment Centre, Lancaster University (Reino Unido).

Resumen

La calidad de la planta producida en vivero condiciona el éxito de las repoblaciones forestales. La morfología es uno de los componentes más característicos del concepto de calidad de planta y se ha relacionado con la supervivencia posplantación. Sin embargo, no existe un consenso sobre el tamaño ideal de las plantas para repoblación, especialmente en áreas mediterráneas donde el uso de plantas más pequeñas podría aumentar su probabilidad de supervivencia debido a su menor consumo de agua. Por ello hemos realizado un meta-análisis, a partir de trabajos científicos, para evaluar si la supervivencia y crecimiento de las plantas en los proyectos de reforestación en el mediterráneo dependen del tamaño de la planta utilizada. También se analiza si las condiciones climáticas, las características funcionales de las especies, el tipo de terreno, y el método de preparación del suelo modulan dicha relación. Nuestros resultados indican que la supervivencia y crecimiento postransplante está relacionada de manera positiva con el tamaño inicial de las plantas. Esta relación fue consistente para todos los grupos funcionales aunque fue más fuerte en el caso de las gimnospermas. Para las angiospermas, dicha relación fue modulada por el clima, disminuyendo el efecto positivo del tamaño de las plantas con la aridez. Nuestros resultados recomiendan el uso de plantas de mayor tamaño en los programas de restauración forestal en áreas mediterráneas.

Palabras clave

Calidad de planta, meta-análisis, morfología, restauración forestal, viveros.

1. Introducción

Los bosques juegan un papel clave en la provisión de servicios ecosistémicos y en el secuestro de carbono, además de albergar dos tercios de la biodiversidad terrestre (MEA 2005). A pesar de ello, la superficie global ocupada por los bosques se ha visto disminuida en más de cien millones de hectáreas a lo largo de las últimas dos décadas a consecuencia principalmente de la deforestación (FAO 2015). En los últimos cinco años los programas de reforestación han conseguido reducir la tasa de pérdida global de cubierta forestal de un 0.18% a un 0.08% anual (FAO 2015). En este sentido, más de dos mil millones de hectáreas han sido identificadas globalmente como áreas potencialmente susceptibles para la puesta en marcha de programas de restauración forestal (MINNEMEYER et al. 2011). Además, se han realizado acuerdos internacionales (Rio+20 ó el Desafío de Bonn) para la restauración de 150 hectáreas de áreas degradadas de aquí a 2020. El coste de dichos programas se ha cifrado en torno a los 18,000 millones de dólares anuales mientras que los beneficios económicos de dichas acciones se han estimado en 84,000 millones de dólares anuales (MENZ et al. 2013). En este contexto, es más que nunca necesario entender las causas que dificultan el éxito de dichos programas de restauración para maximizar los beneficios ecológicos y económicos de dichas medidas sin aumentar los costes de las mismas.

El área mediterránea es un punto caliente para la biodiversidad albergando una gran riqueza de plantas y endemismos. La principal característica del clima mediterráneo es la presencia de un

periodo estival cálido y seco donde el agua es el principal factor limitante para la supervivencia de las plantas (VALLEJO et al. 2012). El clima mediterráneo se caracteriza a su vez por una gran variabilidad interanual en cuanto a la precipitación. Los ecosistemas forestales mediterráneos sufren también una gran presión antrópica fruto de siglos de agricultura, pastoreo, ganadería, explotación de recursos madereros e incendios forestales que han transformado y a veces degradado los ecosistemas naturales. Además de la presencia de áreas degradadas, en las últimas décadas se ha producido un extensivo abandono de campos agrícolas a consecuencia de la migración poblacional desde áreas rurales hacia ciudades y de las políticas agrarias europeas (REY BENAYAS et al. 2007). Esto ha dado lugar al desarrollo de multitud de programas de repoblación los cuales han mostrado un éxito limitado debido principalmente a las altas tasas de mortalidad durante los primeros años de vida a consecuencia del estrés hídrico (VILLAR-SALVADOR et al. 2004). Es necesario pues esclarecer las causas y factores que controlan el desempeño de las plantas mediterráneas en campo para así mejorar las técnicas de producción y plantación de las mismas.

Uno de los factores más importantes asociado al pobre desempeño de las plantas en campo es la calidad de planta (VILLAR-SALVADOR 2003). DURYEY (1985) define una planta de calidad como aquella capaz de alcanzar un desarrollo óptimo (supervivencia y crecimiento) en un ambiente determinado, cumpliendo así los objetivos de cualquier programa de repoblación forestal. Por tanto, la calidad de planta condiciona fuertemente el éxito de una repoblación forestal y la consecución de los objetivos de la misma. Además, una pobre tasa de supervivencia puede generar sobrecostos económicos derivados de la sustitución de marras. La calidad de planta está fuertemente condicionada por el régimen de cultivo de la misma en vivero y es el resultado de cuatro componentes o atributos funcionales: genéticos, morfológicos, fisiológicos y sanitarios. Uno de los principales retos a los que se enfrentan los viveristas y los gestores forestales es determinar que caracteres funcionales son los más apropiados para evaluar la calidad de planta producida en vivero. Dicha evaluación se ha realizado tradicionalmente a partir de los atributos morfológicos de las plantas (GROSSNICKLE et al. 2012) ya que son fácilmente medibles y su evaluación no acarrea ningún gasto adicional. Aquellos atributos relacionados con el tamaño de las plantas, como la altura, el diámetro, el peso seco total o de sus órganos o el ratio entre ellos, están entre los más utilizados. Además estos atributos son buenos indicadores del desempeño en campo de las plantas (GROSSNICKLE et al. 2012; NAVARRO-CERRILLO et al. 2006; TSAKALDIMI et al. 2013) y están relacionados a su vez con importantes atributos fisiológicos como la transpiración o la tasa fotosintética (VILLAR-SALVADOR et al. 2012). De hecho, este tipo de parámetros es usado en las regulaciones relacionadas con el material vegetal a utilizar en repoblaciones vegetales (Alía et al. 2005). No obstante, algunos estudios sugieren que los valores de los atributos morfológicos recogidos actualmente en la legislación deberían ser revisados (NAVARRO-CERRILLO et al. 2006). Por tanto, existe aún cierta falta de consenso con respecto a la morfología recomendada de las plantas para garantizar el correcto desarrollo de las mismas en campo, especialmente en áreas como la mediterránea donde el estrés hídrico es un factor clave para el éxito de los programas de restauración (VILLAR-SALVADOR et al. 2004).

Diversos estudios sugieren que plantas de un mayor tamaño son más apropiadas para su uso en repoblaciones forestales en ambientes boreales y húmedos (NOLAND et al. 2001; SOUTH et al. 2005). Por su parte, existe cierta controversia sobre el tamaño adecuado de las plantas para su uso en repoblaciones forestales en el área mediterránea, a pesar que existen evidencias que apuntan a que las plantas de mayor tamaño tienen un desempeño mejor que las pequeñas (CUESTA et al. 2010; OLIET et al. 2009; TSAKALDIMI et al. 2013; VILLAR-SALVADOR et al. 2004). Sin embargo, otros estudios en ambientes mediterráneos indican que las plantas de menor tamaño muestran una supervivencia mayor que las plantas grandes (TRUBAT et al. 2008; 2011). Esta mayor supervivencia se ha asociado con una estrategia de tolerancia al estrés debido a la menor tasa de transpiración de las plantas pequeñas (LEIVA y FERNANDEZ-ALÉS 1998; TRUBAT et al. 2011). Por su parte la mayor supervivencia de las plantas de mayor tamaño se ha asociado a la mayor tasa de crecimiento (aéreo y radical) de las mismas y por tanto a una mayor capacidad de alcanzar reservas profundas de agua en

el suelo antes del periodo seco (VILLAR-SALVADOR et al. 2012). Es por tanto crucial arrojar luz sobre los atributos morfológicos relacionados con el tamaño de la planta que garanticen el éxito futuro de los programas de restauración forestal llevados a cabo en el área mediterránea.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es determinar el efecto del tamaño inicial y de la relación parte aérea-parte radical (S:R) de las plantas usadas en repoblaciones forestales mediante el análisis de toda la bibliografía disponible al respecto y realizada en ambientes mediterráneos. Para ello hemos llevado a cabo un meta-análisis basado en la correlación entre parámetros morfológicos de las plantas y la supervivencia y crecimiento en campo con el objetivo de establecer el patrón general existente entre tamaño de planta y desempeño en campo. También analizaremos una serie de variables que pueden modular este patrón como la preparación previa del terreno, el tipo funcional de planta, las condiciones climáticas específicas del área de plantación o el uso anterior del suelo. Nuestra hipótesis es que entre plantas de la misma edad un aumento del tamaño y de la S:R mejorará la tasa de supervivencia y crecimiento en campo.

3. Metodología

3.1. Búsqueda bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se realizó en noviembre de 2016 utilizando las bases de datos electrónica: Scopus, Web of Science y de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF). La combinación de términos usados para la búsqueda fue: “supervivencia” OR “desempeño” OR “establecimiento” OR “transplante” AND “calidad de planta” OR “tamaño de planta” OR “calidad de plántula” OR “tamaño de plántula” OR “vivero”. Una vez eliminadas las referencias repetidas, el número total de artículos que arrojó esta búsqueda fue de 12,404. El primer filtro se realizó en base a la temática de los artículos quedándonos con un total de 4,366 artículos publicados en las áreas “agricultura”, “forestal”, “ciencias ambientales” y “ecología”. El título de todos los artículos fue examinado rechazando todos aquellos que no se realizaran sobre plantas y en concreto sobre plantas leñosas. Esto resultó en un total de 602 artículos a los que se procedió a leer el resumen de todos ellos descartando aquellos estudios que no cumplían con los siguientes criterios:

- 1) El estudio debe aportar información sobre el tamaño de la planta al final de la fase de vivero y sobre supervivencia y/o crecimiento en condiciones reales de campo. Los experimentos en que la supervivencia o el crecimiento se evaluaron en contenedores fueron descartados.
- 2) Las diferencias en tamaño entre plantas al final de la fase de vivero no pueden deberse a distintas edades (p. ej: 1+0 vs 2+0), método de producción (contenedor vs raíz desnuda), micorrización o distintas procedencias. Este criterio se eligió para evitar cualquier posible efecto subyacente que pudiera sesgar el efecto propio del tamaño de las plantas en el desempeño en campo.

Aquellos estudios que no fueron descartados o que no se estaba completamente seguro de reunir estos criterios fueron leídos en profundidad. Finalmente se seleccionó un total de 289 estudios de los cuales 59 de ellos fueron llevados a cabo en ambientes mediterráneos.

3.2. Estructura de la base de datos y extracción de los mismos

Para cada uno de los artículos revisados se extrajo información que se organizó en tres apartados: información del estudio, información de cada caso y los datos propios. En el apartado “información del estudio” se estableció un número de identificación para el estudio, se recogió información referente al autor del mismo, año de publicación y revista, además del número de casos

dentro del estudio. Un mismo estudio puede dar lugar a distintos casos. Por ejemplo, si se consideró más de una especie, cada una de ellas fue un caso distinto; si hubo dos o más técnicas de cultivo que dio lugar a diferencias en tamaño de las plantas, cada una se consideró un caso distinto; si se plantaron distintas edades, cada una supuso un caso distinto; si se utilizó distintas parcelas de estudio o fechas de plantación, cada una fue un caso distinto.

El apartado referente a cada caso recogió información referente a las condiciones de cultivo y plantación específicas de cada caso de estudio tales como: especie, método de producción (contenedor o raíz desnuda), tratamiento en vivero, edad de las plántulas, localización del lugar de plantación, coordenadas del lugar, uso del suelo (forestal o agrícola), temperaturas y precipitación media histórica del área, fecha de plantación, densidad de plantación, fecha de evaluación del desempeño en campo, preparación de suelo, control de hierbas, fertilización en campo o riego de establecimiento. Con los datos de temperatura y precipitación calculamos el índice de aridez de Lung (temperatura media dividido por precipitación media anual). Cuando alguno de los campos no se proporcionaba en el texto del estudio se contactó a los autores. En aquellos casos en que no se proporcionó las coordenadas del sitio se usó la localización proporcionada para establecer las coordenadas del mismo mediante la herramienta Google Earth® que también sirvió para establecer el uso previo del suelo en caso de que este no fuera suministrado. Cuando los datos meteorológicos no fueron suministrados se usó la base de datos WorldClim (HIJMANS et al. 2015).

Como nuestro interés es evaluar la asociación entre dos variables continuas (tamaño y S:R vs supervivencia y crecimiento) hemos llevado a cabo un meta-análisis basado en el coeficiente de correlación (r) (KORICHEVA et al. 2013). Además r puede ser calculado a partir de otros estadísticos lo que es de gran utilidad dada la gran variabilidad de estudios que evalúan el efecto del tamaño de las plántulas en el desempeño en campo. Nuestras variables respuestas o dependientes fueron la supervivencia y el crecimiento. La supervivencia suele ser expresada como porcentaje, mientras que el crecimiento se evalúa como la diferencia entre los valores finales e iniciales de peso total (g), peso del tallo (g), volumen del tallo (m^3), diámetro (mm) o altura (cm). Si el estudio presenta datos de mortalidad estos se transforman en supervivencia, mientras que si se aportan datos de crecimiento relativo (RGR), primero se calcula el tamaño final de las plantas ($M2$, eq.1) a partir del tamaño inicial de las mismas ($M1$) y el tiempo transcurrido entre mediciones (t) y posteriormente se calcula la diferencia entre ambos tamaños ($M2 - M1$).

$$M2 = M1 \times e^{(RGR \times t)} \quad \text{eq.1}$$

Las variables independientes en nuestro estudio son aquellas relacionadas con el tamaño inicial de la planta en el momento de la plantación: peso total (g), peso del tallo (g), volumen del tallo (m^3), diámetro (mm), altura (cm) y S:R. Dependiendo del estadístico proporcionado en los diferentes estudios seleccionados el coeficiente de correlación fue calculado de una u otra forma. Los estadísticos usados fueron el propio r , el R^2 , el valor de la X^2 cuando los datos fueron analizados mediante una regresión logística, el valor medio y la desviación estándar o el valor del estadístico t cuando se compararon dos grupos de plantas, y el valor del estadístico F cuando los datos se analizaron mediante un ANOVA de una vía.

3.3. Análisis estadístico

En primer lugar se transformaron el valor de los diferentes estadísticos en el coeficiente de correlación mediante el uso de las distintas ecuaciones propuestas en KORICHEVA et al. (2013). Como r tiene una distribución sesgada cuando se acerca a los valores de 1 y -1, se utilizó la transformación de Fisher para obtener un parámetro (z) con unas propiedades estadísticas deseables (KORICHEVA et al. 2013). Dicha transformación y el cálculo de la varianza asociada a cada estudio (vz) a partir del número de muestras (n) se realizó con las ecuaciones 2 y 3:

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{(1+r)}{(1-r)} \quad \text{eq.2}$$

$$vz = \frac{1}{(n-3)} \quad \text{eq.3}$$

Se realizaron análisis por separado para las siguientes relaciones: supervivencia y tamaño inicial, supervivencia y S:R inicial, crecimiento y tamaño inicial, y crecimiento y S:R inicial. Como tanto el tamaño inicial como el crecimiento se pudo expresar en base a distintos parámetros, se seleccionó solo uno de ellos atendiendo al siguiente orden de prioridad: masa total, diámetro, masa aérea y altura.

Para el análisis del efecto del tamaño inicial y el S:R en la supervivencia y el crecimiento postransplante se utilizó un modelo mixto ajustado para meta-análisis (KORICHEVA et al. 2013). Se seleccionó un modelo aleatorio asumiendo que los diferentes casos de estudios considerados son una muestra aleatoria de una población mayor. Esto implica que la heterogeneidad de la relación entre tamaño y desempeño en campo no es solo una consecuencia del error de muestreo para cada caso de estudio (modelo de efectos fijos) sino que tiene una componente aleatoria debida a las características específicas de cada estudio (p. ej: diseño, fechas,...). En nuestro caso existe una estructura en los datos ya que cada estudio analizado puede dar lugar a varios casos de estudios. Esto implica que los casos de estudio derivados de un mismo artículo estarán más correlacionados entre sí que con los casos de estudios presentes en otros artículos. Por ello, el artículo se considera como un factor aleatorio en nuestro modelo estadístico. Finalmente consideramos una serie de “moderadores” que podrían explicar parte de la heterogeneidad observada en la relación entre tamaño y desempeño en campo. Estos moderadores fueron: “índice de Lung”, “tipo funcional” (gimnosperma vs angiosperma), “uso del suelo” (forestal vs agrícola) y “preparación de suelo” (Alta vs Baja).

Para cada una de las relaciones estudiadas se ajustó un modelo aleatorio, en el que cada artículo fue considerado como un efecto aleatorio, mediante el método de máxima verosimilitud restringida. Este modelo nos permitió calcular la heterogeneidad total I^2 (HIGGING y THOMPSON 2002). Posteriormente se ajustó un modelo mixto en el que se consideró el efecto de cada uno de los moderadores y de las interacciones “índice de Lung x tipo funcional”, “índice de Lung x preparación del suelo” y “Preparación del suelo x uso del suelo”. La selección de modelos se realizó mediante un proceso “hacia atrás” y siguiendo el principio de parsimonia basado en el criterio de información de Akaike (AIC) (ZUUR et al. 2009). Primero se ajustó un modelo saturado que incluía todos los efectos principales y las interacciones mencionadas. Después se comparó el AIC de este modelo con aquellos en los que se eliminó cada interacción (ronda 1). Posteriormente, se comparó el modelo seleccionado tras comprobar las distintas interacciones con modelos en los que se eliminaba cada uno de los efectos principales no presentes en las interacciones (ronda 2). Si la diferencia entre un modelo más complejo y otro más simple era inferior a dos unidades positivas de AIC se seleccionó el modelo más simple siguiendo el principio de parsimonia (BURNHAM y ANDERSON 2002). Cuando una de las variables categóricas fue seleccionada se exploró las diferencias entre los niveles del factor mediante un test de Wald. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo en R v3.2.5 usando el paquete *metafor* (VIECHTBAUER 2010).

4. Resultados

4.1. Relación entre supervivencia y tamaño inicial

El valor de la heterogeneidad total para la supervivencia fue muy alto ($I^2 = 98.28\%$) indicando que existe una alta variabilidad en los coeficientes de correlación entre el tamaño inicial de las plantas y su supervivencia posterior, y que solo una pequeña proporción de esta variabilidad es debida a errores de muestreo. El tamaño inicial de la planta tuvo un efecto significativo ($p < 0.001$) y

positivo en la supervivencia de las plantas en campo. El valor medio ponderado del coeficiente de correlación entre ambos parámetros (\pm error estándar) fue de 0.53 ± 0.13 . El modelo final seleccionó la interacción entre el índice de Lung y el tipo funcional de planta, además de estos efectos principales (Tabla 1a). Aunque la relación entre tamaño inicial de planta y supervivencia fue positiva para ambos tipos funcionales de planta, dicha relación fue más fuerte para las gimnospermas que para las angiospermas ($p < 0.0001$, Figura 1). Dicha diferencia es debida a la distinta respuesta de la relación entre ambos parámetros con respecto al índice de Lung en función del grupo funcional (Figura 2).

4.2. Relación entre supervivencia y S:R inicial

La heterogeneidad total para esta relación fue también alta ($I^2 = 86.38\%$). Al igual que para el tamaño inicial, la relación entre S:R y supervivencia fue positiva ($p < 0.001$) mostrando un valor medio ponderado del coeficiente de correlación entre ambos parámetros (\pm error estándar) de 0.22 ± 0.17 . Sin embargo ninguno de los moderadores fue seleccionado en el modelo final (Tabla 1b).

4.3. Relación entre crecimiento postransplante y tamaño inicial

La heterogeneidad total fue menor que en los casos anteriores pero aún bastante alta ($I^2 = 60.00\%$) sugiriendo que la variabilidad obtenida es fruto de los distintos casos de estudios y no del error de muestreo. La relación entre tamaño inicial y crecimiento en campo fue también positiva y significativa ($p < 0.001$) aunque más débil que en los casos anteriores ($r = 0.09 \pm 0.04$). El modelo final seleccionó solo el efecto del tipo funcional (Tabla 1c). Las angiospermas mostraron una relación positiva mayor entre tamaño inicial de planta y crecimiento postransplante ($r = 0.18 \pm 0.05$) mientras que la relación para las gimnospermas fue no significativamente distinta de cero.

Tabla 1. Comparación entre modelos para evaluar el efecto del índice de Lung (L), el tipo funcional de planta (TF), la preparación del suelo (PS), el uso del suelo (US) y sus interacciones en la relación entre supervivencia y tamaño inicial (a), supervivencia y S:R inicial (b), crecimiento y tamaño inicial (c), y crecimiento y S:R inicial (d). La comparación se realizó en función a los valores de AIC, cuando la diferencia entre modelos fue menor a 2 unidades positivas de AIC se seleccionó el modelo más simple. Al principio de la ronda 2 se indica el modelo seleccionado de la ronda 1 y su AIC (entre paréntesis). Al final se indica el modelo seleccionado para cada una de las relaciones estudiadas.

Modelo <i>Ronda 1</i>	Superv. vs tamaño		Superv. vs S:R		Crecim. vs tamaño		Crecim. vs S:R	
	AIC	Δ AIC	AIC	Δ AIC	AIC	Δ AIC	AIC	Δ AIC
Completo	571.2	0	143.3	0	119.6	0	109.1	0
No L x TF	611.5	40.3	142.9	-0.4	117.3	-2.3	109.4	0.3
No L x PS	571.1	-0.1	143.3	0.4	118.0	-1.6	109.6	0.5
No PS x US	570.7	-0.5	143.6	0.3	117.0	-2.6	112.6	3.5
<i>Ronda 2</i>	<i>L x TF</i> (570.9)		<i>No interacción</i> (143.5)		<i>No interacción</i> (113.3)		<i>PS x US</i> (112.6)	
No L	-	-	145.2	1.7	121.7	8.4	115.5	-1.6
No TF	-	-	143.4	-0.1	110.9	-4.2	115.5	-1.6
No PS	567.2	-3.7	144.1	0.6	109.1	-4.7	-	-
No US	571.3	0.4	145.1	1.6	108.6	-2.4	-	-
Final	<i>L x TF</i>		<i>Modelo nulo</i>		<i>TF</i>		<i>PS x US</i>	

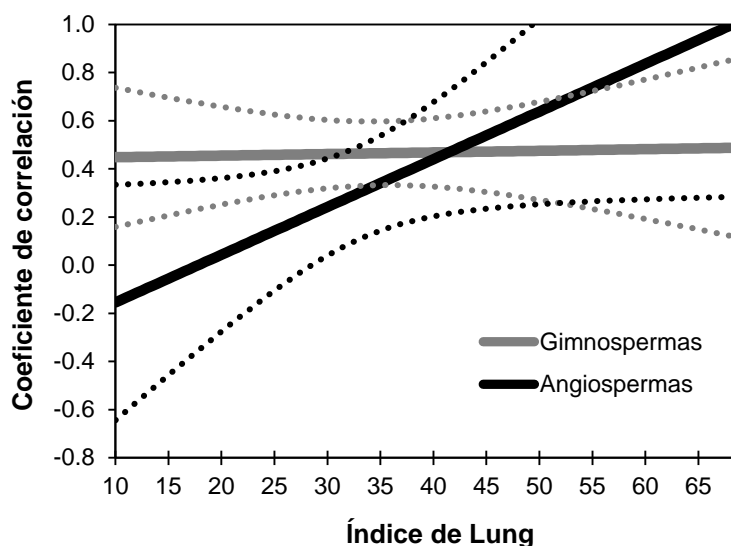


Figura1. Relación del coeficiente de correlación entre supervivencia y tamaño de planta inicial estimado para el modelo seleccionado y el índice de Lung para cada uno de los grupos funcionales de plantas (\pm intervalo de confianza 95%).

4.4. Relación entre crecimiento postransplante y S:R inicial

De nuevo la heterogeneidad mostró valores elevados ($I^2 = 94.09\%$). La relación entre el S:R inicial de las plantas y su crecimiento posterior fue significativa ($p < 0.001$) y positiva aunque el error estándar asociado fue elevado ($r = 0.401 \pm 0.332$). El modelo final seleccionó la interacción entre la preparación de suelo y el uso previo del mismo (Tabla 1d). La relación entre S:R inicial y el crecimiento posterior solo fue significativamente distinta de cero en aquellas plantaciones realizadas en suelo agrícola y donde la preparación del suelo fue intensa.

5. Discusión

Nuestros resultados evidencian la existencia de una relación positiva entre la supervivencia y crecimiento de las plantas en campo y su tamaño y S:R iniciales. Estos resultados son consistentes con una revisión anterior de NAVARRO-CERRILLO et al. (2006) donde el número de estudios que mostraban una relación positiva entre supervivencia y tamaño inicial era tres veces superior a los estudios en los que dicha relación era negativa. En nuestro estudio el número de relaciones positivas entre ambos parámetros fue 3.7 veces superior al número de relaciones negativas (66 positivos vs 18 negativos), aportando consistencia a la hipótesis de que las plantas con mayor tamaño presentan una supervivencia mayor en las plantaciones forestales mediterráneas.

Las bases fisiológicas de esta relación positiva pueden estar relacionadas con el mayor tamaño de los órganos aéreos de la planta y por tanto la mayor biomasa foliar de las mismas que proporciona una mayor capacidad fotosintética (VILLAR-SALVADOR et al. 2012). Esto implica un mayor suministro de carbohidratos tanto para el crecimiento aéreo como radical (DEL CAMPO et al. 2010; TRUBAT et al. 2011; VILLAR-SALVADOR et al. 2012). Además el incremento en el tamaño de la planta sin un descenso en la concentración de nitrógeno, por un efecto dilución, aumenta el contenido en nitrógeno total de las plantas (ANDIVIA et al. 2011), mejorando el potencia de removilización de este nutriente (VILLAR-SALVADOR et al. 2012) que finalmente controla el crecimiento de nuevos órganos en las plantas (MILLARD y GRELET 2010). Debido a que las plantaciones en el área mediterránea suelen producirse en la época húmeda, esta mayor capacidad de removilizar recursos aumentará el crecimiento de las plantas permitiendo su rápido establecimiento y colonización del suelo tras la plantación permitiendo así “evitar” el estrés hídrico en verano (VILLAR-SALVADOR et al. 2012). La sequía estival es el mayor factor limitante para el establecimiento de las plántulas en ambientes mediterráneos (CORTINA et al. 2006). Por lo tanto, el desarrollo de un sistema radicular extenso y

profundo antes de la llegada del verano a consecuencia de altas tasas de crecimiento en primavera mejorará la capacidad de absorción de agua durante la época seca (PADILLA y PUGNAIRE 2007). Además de una mayor tasa de absorción de agua fruto de la colonización de reservas profundas de agua, la capacidad de absorción de nutrientes del suelo se podría ver también beneficiada por la presencia de un sistema radical más desarrollado permitiendo así tener una mayor disponibilidad de recursos para la planta (VILLAR-SALVADOR et al. 2012). Además de todo esto, las plantas más grandes pueden desplazar a otras plantas, especialmente hierbas (DURYEA 1985), que aparecen normalmente después de la realización de las labores de repoblación y que pueden competir con las plántulas por los recursos del suelo (REY BENAYAS et al. 2005). No obstante otros estudios han mostrado una relación negativa entre supervivencia y tamaño de plantas (LEIVA y FERNÁNDEZ-ALÉS 1998; TUTTLE et al. 1988; TRUBAT et al. 2011), hecho que comúnmente se ha asociado con una mejor eficiencia del uso del agua y una menor transpiración de las plantas más pequeñas. La ausencia de una relación positiva entre tamaño inicial de planta y supervivencia en campo en estos estudios puede estar relacionada con una ausencia total de precipitaciones después de la plantación (TRUBAT et al. 2011), la realización de la plantación en fechas próximas al verano (ANDIVIA et al. 2011), o la inapropiada preparación del terreno (LÖF et al. 2012).

Los resultados de este meta-análisis muestran una mayor relación entre los parámetros morfológicos de las plantas y la supervivencia que con el crecimiento posterior en campo. En la mayoría de los estudios revisados el crecimiento fue evaluado después de la primera estación de crecimiento lo que puede haber condicionado los resultados ya que diversos estudios muestran que las diferencias en crecimiento entre plantas de distinto tamaño se acentúan con el tiempo (CHAVASSE 1997; THOMPSON 1985; TUTTLE et al. 1988). Además como el crecimiento es medido en las plantas que sobreviven podemos esperar que la diferencia sea menor ya que estas se encuentran bien establecidas independientemente del tamaño inicial de las mismas. Sin embargo las plantas más grande aunque presenten tasas de crecimiento similares a las plantas de tamaño menor, tienden a mantener la diferencia de tamaño al final de la estación de crecimiento lo que las hace más competitivas en plantaciones forestales a largo plazo (JACOBS et al. 2005).

Uno de los principales resultados de nuestro estudio es que el grupo funcional de las plantas determina la relación entre el tamaño de planta y su supervivencia, mostrando las gimnospermas una relación más positiva que las angiospermas. Este resultado, sin embargo depende de la aridez del clima tal y como indica la selección de la interacción entre grupo funcional e índice de Lung en el modelo final para la relación tamaño de planta y supervivencia (Tabla 1a, Figura 1). Cuanto más árido es el clima, menos positiva es la correlación entre tamaño y supervivencia para las angiospermas, mientras que dicha relación permanece constante para todo el gradiente de aridez en el caso de las plantas gimnospermas. Aunque en el extremo más árido del gradiente la correlación se vuelve negativa los intervalos de confianza son amplios por lo que dicha correlación no es significativamente distinta de cero sugiriendo que en condiciones muy áridas no existe relación entre el tamaño de las plantas y su supervivencia. No obstante un índice de Lung por debajo de 15 en un clima mediterráneo continental (temperatura media 13-15 °C) implica precipitaciones por debajo de 200 mm anuales, situaciones que no suelen producirse en la península ibérica. Sin embargo, habrá que prestar especial atención a las plantaciones con angiospermas en zonas de clima mediterráneo con temperaturas medias en torno a los 18°C ya que en años muy secos (< 240 mm) puede que la relación entre tamaño y supervivencia se vuelva negativa.

La diferente relación con el clima de los distintos grupos funcionales de planta puede estar relacionado con diferencias en el sistema hidráulico entre ambos grupos de plantas. En nuestro estudio las plantas gimnospermas estuvieron principalmente representadas por coníferas, cuyo xilema está compuesto por traqueidas que confieren una menor transpiración y capacidad fotosintética. Por su parte, el xilema de las angiospermas está constituido por vasos más anchos que las traqueidas (FAHN et al. 1999), permitiendo unas mayores tasas de transpiración y fotosíntesis (MACELWAIN et al. 2016; REICH et al. 1995). Bajo condiciones adversa por baja disponibilidad hídrica

las gimnospermas podrían tener una cierta ventaja ya que su sistema hidráulico les permite consumir agua más lentamente y evitar así estresarse hídricamente. Las diferencias en cuanto a la morfología foliar entre ambos grupos podría también conferir cierta ventaja a las gimnospermas ya que la presencia de hojas anchas en las angiospermas les confiere una mayor capacidad fotosintética pero también requiere una mayor demanda hídrica. Por otro lado, la mayor capacidad de transporte de agua proporcionada por los vasos conductores presentes en las angiospermas podría explicar el incremento en la relación supervivencia-tamaño con el índice de Lung, ya que las características de su sistema hidráulico les proporcionarían una ventaja competitiva en condiciones de alta productividad (FAHN et al. 1999).

La proporción entre la parte aérea y el sistema radical también se relacionó positivamente con la supervivencia aunque la relación fue más débil ($r = 0.09$). Valores altos de S:R se han relacionado negativamente con la supervivencia de las plantas en campo debido a la desproporción entre la transpiración de los tejidos aéreos y la superficie absorbente de la planta (DEL CAMPO et al. 2010; THOMPSON 1985). Diversos estudios han mostrado que el S:R no es un buen predictor de la supervivencia en campo (BERNIER et al. 1995; THOMPSON 1985), nuestro estudio demuestra que el tamaño inicial es mejor predictor de la supervivencia. Sin embargo, hemos encontrado una fuerte relación entre S:R y crecimiento en campo ($r = 0.40$) que podría estar relacionada con la mayor capacidad fotosintéticas de las plantas con una mayor biomasa foliar (VILLAR-SALVADOR et al. 2012). Dicha relación fue más fuerte que en el caso de la relación entre tamaño inicial y crecimiento postransplante. Para caracterizar el tamaño inicial de las plantas usamos diversos parámetros morfológicos (peso seco, diámetro o altura). La altura ha sido comúnmente identificada como un mal predictor del desempeño en campo (CHAVASSE 1997; GROSSNICKLE 2012). Aproximadamente en un 25% de nuestros casos de estudio el tamaño de la planta se ha caracterizado a partir de la altura de las mismas, lo que puede haber enmascarado el efecto positivo del tamaño de la planta en el crecimiento postransplante. Aun así nuestro meta-análisis indica que las plantas más grandes crecen más en campo que las más pequeñas.

En el caso de la relación entre crecimiento postransplante y S:R el modelo seleccionado incluyó la interacción entre el uso del suelo y la preparación del mismo. Para ambos usos del suelo (forestal y agrícola) existió una tendencia positiva en esta relación cuando la preparación del suelo tuvo una intensidad alta. Este efecto positivo de la preparación del suelo puede estar relacionada con el hecho de que las preparaciones más intensas de suelo (p. ej. subsolado) suelen alcanzar horizontes más profundos del mismo lo que facilitaría la colonización profunda del suelo por parte del sistema radical de las plantas (LÖF et al. 2012). Además las plantas cultivadas en contenedores suelen aumentar el tamaño de ambos órganos (aéreo y sistema radical), aunque la tasa de crecimiento del tallo suele ser mayor que la de las raíces. En estas circunstancias las plantas con un mayor S:R pueden beneficiarse de su mayor tasa fotosintética, especialmente en suelos ricos y profundos como es el caso de los suelos agrícolas. Sin embargo y en contra de nuestras hipótesis no hemos encontrado ningún efecto de la preparación del suelo o del uso previo del mismo en la relación entre el tamaño inicial de las plantas y la supervivencia y el crecimiento postransplante. Estos resultados indican que existe un patrón consistente en la relación entre el tamaño de planta y el desempeño en campo sugiriendo el uso de plantas de mayor tamaño en los programas de repoblación forestal en el área mediterránea.

Desafortunadamente existen muy pocos estudios sobre análisis coste-beneficio del uso de distintos tamaños de plantas en repoblaciones forestales en el área mediterránea (NAVARRO-CERRILLO et al. 2006; PUÉRTOLAS et al. 2012), probablemente porque los programas de reforestación en esta área priman los objetivos de restauración de la cubierta vegetal más que la producción maderera. En general, el coste de las repoblaciones aumenta debido a la reposición de marras a consecuencia de altas tasas de mortalidad. En este sentido, el uso de plantas de mayor tamaño reduciría la mortalidad y por tanto los costes asociados, aunque la producción de planta de mayor tamaño suele llevar asociado un coste adicional derivado del uso de fertilizantes o contenedores de mayor tamaño. PUÉRTOLAS et al. (2012) estimó que el uso de contenedores con el

doble de tamaño al habitual usado en ambientes mediterráneos suponía un aumento del coste de producción de cada planta en torno a los 30 céntimos de €, costes mucho menores a incrementar la dosis de fertilizante. En este contexto el uso de la fertilización tardía podría ser una herramienta útil ya que el incremento de la dosis de fertilizante es menor mientras que aumenta el tamaño de las plantas y mejora la resistencia a factores de estrés (ANDIVIA et al. 2012, 2014; OLIET et al. 2013).

6. Conclusiones

Nuestros resultados indican claramente que el aumento del tamaño de las plantas usadas en repoblaciones forestales en el área mediterránea conlleva un aumento en la supervivencia y crecimiento postransplante y por tanto en la consecución de objetivos de restauración. Esta relación fue consistente para todos los grupos funcionales de plantas aunque la relación fue más fuerte en el caso de las gimnospermas. En el caso de las angiospermas, dicha relación fue modulada por el clima disminuyendo el efecto positivo del tamaño de las plantas con la aridez. La preparación intensa del suelo mejoró la relación entre los parámetros morfológicos y el desempeño en campo, especialmente cuando la plantación se llevó a cabo en suelos agrícolas.

7. Agradecimientos

Enrique Andivia agradece la financiación recibida por parte del Ministerio de Economía y Competitividad mediante una “Ayuda para la Formación Posdoctoral” (FPDI-2013-15573) y a la red Remedinal-3 (S2013/MAE-2719) de la Comunidad de Madrid.

8. Bibliografía

ALÍA, R.; ALBA, N.; AGÚNDEZ, D.; IGLESIAS, S.; 2005. Manual para la comercialización y producción de semillas y plantas forestales. Dirección General de Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid

ANDIVIA, E.; FERNÁNDEZ, M.; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; 2011. Autumn fertilization of *Quercus ilex* ssp. *ballota* (Desf.) Samp. nursery seedlings: effects on morpho-physiology and field performance. *Annals of Forest Science* 68: 543–553

ANDIVIA, E.; MÁRQUEZ-GARCÍA, B.; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; CÓRDOBA, F.; FERNÁNDEZ, M.; 2012. Autumn fertilization with nitrogen improves nutritional status, cold hardiness and the oxidative stress response of Holm oak (*Quercus ilex* ssp. *ballota* [Desf.] Samp) nursery seedlings. *Trees – Structure and Function* 26: 311-320

ANDIVIA, E.; FERNÁNDEZ, M.; VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; 2014. Assessing the effect of late-season fertilization on Holm oak plant quality: insights from morpho–nutritional characterizations and water relations parameters. *New Forests* 45:149-163

BERNIER, P.Y.; LAMHAMEDI, M.S.; SIMPSON, D.G.; 1995. Shoot:root ratio is of limited use in evaluating the quality of container conifer stock. *Tree Planters’ Notes* 46: 102–106

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R.; 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach. Springer-Verlag, New York.

DEL CAMPO, A.D.; NAVARRO, R.M.; CEACERO, C.J.; 2010. Seedling quality and field performance of commercial stocklots of containerized holm oak (*Quercus ilex*) in Mediterranean Spain: an approach for establishing a quality standard. *New Forests* 39: 17-37

CHAVASSE, C.G.R.; 1977. The significance of planting height as an indicator of subsequent seedling growth. *New Zealand Journal of Forestry* 22: 283-296

CORTINA, J.; MAESTRE, F.T.; VALLEJO, R.; BAEZA, M.J.; VALDECANTOS, A.; PÉREZ-DEVESA, M.; 2006. Ecosystem structure, function, and restoration success: Are they related? *Journal for Nature Conservation* 14: 152-160

CUESTA, B.; VILLAR-SALVADOR, P.; PUÉRTOLAS, J.; JACOBS, D.F.; REY BENAYAS, J.M.; 2010. Why do large, nitrogen rich seedlings better resist stressful transplanting conditions? A physiological analysis in two functionally contrasting Mediterranean forest species. *Forest Ecology and Management* 260: 71-78

DURYEA, M.L.; 1985. Evaluating seedling quality: importance to reforestation. In: DURYEA, M.L (ed) Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Oregon, pp 1-4

FAHN, A.; 1982. Anatomía vegetal. Edición Pirámide Madrid

FAO; 2015. Forest Resource Assessment 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

GROSSNICKLE, S.C.; 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43:711-738

HIGGINS, J.P.; THOMPSON, S.G.; 2002. Quantifying heterogeneity in meta-analysis. *Statistics in Medicine* 21: 1539-1558

HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A.; 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.

JACOBS, D.F.; SALIFU, K.F.; SEIFERT, J.R.; 2005. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. *New Forests* 30: 235-251

KORICHEVA, J.; GUREVITCH, J.; MENGERSEN, K.; 2013. Handbook of meta-analysis in ecology and evolution. Princeton University Press: Princeton & Oxford.

LEIVA, M.J.; FERNÁNDEZ-ALÉS, R.; 1998. Variability in seedling water status during drought within a *Quercus ilex* subsp *ballota* population, and its relation to seedling morphology. *Forest Ecology and Management* 111: 147-156

LÖF, M.; DEY, D.C.; NAVARRO, R.M.; JACOBS, D.F.; 2012. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests* 43:825-848

MACELWAIN, J.C.; YIOTIS, C.; LAWSON, T.; 2016. Using modern plant trait relationships between observed and theoretical maximum stomatal conductance and vein density to examine patterns of plant macroevolution. *New Phytologist* 209: 94-103.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT; 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC

MENZ, M.; DIXON, K.; HOBBS, R.; 2013. Hurdles and Opportunities for Landscape-Scale Restoration. *Science* 339: 526-527.

- MILLARD, P.; GRELET, G.; 2010. Nitrogen storage and remobilization by trees: ecophysiological relevance in a changing world. *Tree Physiology* 30: 1083-1095
- MINNEMEYER, S.; LAESTADIUS, L.; SIZER, N.; SAINT-LAURENT, C.; POTAPOV, P.; 2011. A world of opportunity. www.forestlandscaperestoration.org.
- NAVARRO-CERRILLO, R.M.; VILLAR-SALVADOR, P.; DEL CAMPO, A.; 2006. Morfología y establecimiento de los plantones. In: CORTINA, J.; PEÑUELAS, J.L.; PUÉRTOLAS, J.; SAVÉ, R.; VILAGROSA, A.; (eds) Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos degradados. Estado actual de conocimientos. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp 67-88
- NOLAND, T.L.; MOHAMMED, G.H.; WAGNER, R.G.; 2001. Morphological characteristics associated with tolerance to competition from herbaceous vegetation for seedlings of jack pine, black spruce, and white pine. *New Forest* 21: 199–215.
- OLIET, J.A.; TEJADA, M.; SALIFU, K.F.; COLLAZOS, A.; JACOBS, D.F.; 2009. Performance and nutrient dynamics of Holm oak (*Quercus ilex* L.) seedlings in relation to nursery nutrient loading and post-transplant fertility. *European Journal of Forest Research* 128: 253–263
- OLIET, J.A.; PUÉRTOLAS, J.; PLANELLES, R.; JACOBS, D.F.; 2013. Nutrient loading of forest tree seedlings to promote stress resistance and field performance: a Mediterranean perspective. *New Forests* 44:649–669
- PADILLA, F.M.; PUGNAIRE, F.I.; 2007. Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. *Functional Ecology* 21: 489-495
- PUÉRTOLAS, J.; JACOBS, D.F.; BENITO, L.F.; PEÑUELAS, J.L.; 2012. Cost-benefit analysis of different container capacities and fertilization regimes in *Pinus* stock-type production for forest restoration in dry Mediterranean areas. *Ecological Engineering* 44: 210- 215
- REICH, P.B.; WALTERS, M.B.; KLOEPEL, B.D.; ELLSWORTH, D.S.; 1995. Different photosynthesis nitrogen relations in deciduous hardwood and evergreen coniferous tree species. *Oecologia* 104:24–30
- REY BENAYAS, J.M.; NAVARRO, J.; ESPIGARES, T.; NICOLAU, J.M.; ZAVALA, M.A.; 2005. Effects of artificial shading and weed mowing in reforestation of Mediterranean abandoned cropland with contrasting *Quercus* species. *Forest Ecology and Management* 212: 302-314
- REY BENAYAS, J.M.; MARTINS, A.; NICOLAU, J.M.; SCHULZ, J.; 2007. Abandonment of agricultural land: an overview of drivers and consequences. *Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 20
- SOUTH, D.B.; VANDERSCHAAF, CL.; BRITT, J.R.; 2005. Reforestation Costs can be decreased by lowering initial stocking and outplanting morphologically improved seedlings. *Native Plants* 6:76-8207 2, No. 057
- THOMPSON, B.E.; 1985. Seedling morphological evaluation – what you can tell by looking. In: DURYEA, M.L. (Ed) Evaluating Seedling Quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. Workshop held October 16- 18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Oregon, pp. 59-72

- TRUBAT, R.; CORTINA, J.; VILAGROSA, A.; 2008. Short-term nitrogen deprivation increases field performance in nursery seedlings of Mediterranean woody species. *Journal of Arid Environments* 72: 879-890
- TRUBAT, R.; CORTINA, J.; VILAGROSA, A.; 2011. Nutrient deprivation improves field performance of woody seedlings in a degraded semi-arid shrubland. *Ecological Engineering* 37: 1164-1173
- TSAKALDIMI, M.; ZAGAS, T.; TSITSONI, T.; GANATSAS, P.; 2005. Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterranean evergreen oak species raised in different container types. *Plant and Soil* 278:85-93
- TUTTLE, C.L.; SOUTH, D.B.; GOLDEN, M.S.; MELDAHLS, R.S.; 1988. Initial *Pinus taeda* seedling height relationships with early survival and growth. *Canadian Journal for Forest Research* 18: 867-871
- VALLEJO, V.R.; ALLEN, E.B.; ARONSON, J.; PAUSAS, J.G.; CORTINA, J.; GUTIÉRREZ, J.R.; 2012. Restoration of Mediterranean-Type Woodlands and Shrublands. In: VAN ANDEL, J.; ARONSON, J. (eds) *Restoration Ecology: the new frontier*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, pp130-144
- VIECHTBAUER, W.; 2010. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software* 36: 1-48
- VILLAR-SALVADOR, P.; 2003. Importancia de la Calidad de Planta en los Proyectos de Revegetación. Restauración de Ecosistemas Mediterráneos. Capítulo IV: 66-80.
- VILLAR-SALVADOR, P.; PLANELLES, R.; ENRÍQUEZ, E.; PEÑUELAS RUBIRA, J.; 2004. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships in the Mediterranean oak *Quercus ilex* L. *Forest Ecology and Management* 196: 257-266
- VILLAR-SALVADOR, P.; PUERTOLAS, J.; CUESTA, B.; PEÑUELAS, J.L.; USCOLA, M.; HEREDIA-GUERRERO, N.; REY BENAYAS, J.M.; 2012. Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations. Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New Forests* 43: 755-770
- ZUUR, A.F.; IENO, E.N.; WALKER, N.J.; SAVELIEV, A.A.; SMITH, G.M.; 2009. *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer, Heidelberg, Germany