

Metodologías para la optimización de la producción viverística y la restauración de zonas mediterráneas afectadas por grandes incendios

Nacima Meghelli

Mayo 2006



CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals)

Unitat d'Ecologia Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia
Facultat de Ciències
Universitat Autònoma de Barcelona

Metodologías para la optimización de la producción viverística y la restauración de zonas mediterráneas afectadas por grandes incendios

Memoria presentada por:

Nacima Meghelli

Para optar al grado de Doctora

Los directores del trabajo de tesis:

Dr. Josep Maria Espelta

Investigador del CREAM
Universitat Autònoma de Barcelona

Dr. Robert Savé

Investigador del IRTA
IRTA-Cabrils

Bellaterra, marzo de 2006

Edifici C – Campus de la UAB – 08193 Bellaterra (cerdanyola del vallés) – Barcelona. Spain
Tel.: 34 – 93 581 3353 – Fax: 34 – 93 581 4151

Als meus pares

Als meus germans

Índice

Introducción general	1
Capítulo 1	
Efecto de la capacidad de retención de agua del sustrato en el patrón de crecimiento de 4 especies forestales mediterráneas.	11
Capítulo 2	
Evaluación del incremento en la temperatura y CO ₂ atmosféricos en vivero en el patrón de crecimiento de 4 especies forestales mediterráneas.	33
Capítulo 3	
Efecto de la aplicación de fango térmico durante el establecimiento en campo de plántulas de <i>Quercus ilex</i> , <i>Quercus humilis</i> y <i>Pinus nigra</i> endurecidas previamente en vivero.	61
Capítulo 4	
Respuesta de las plántulas de <i>Pinus nigra</i> y <i>Pinus pinaster</i> procedentes de diferentes condiciones ambientales en vivero a la aplicación de fango térmico y tubos protectores en la reforestación de una zona quemada.	85
Capítulo 5	
Discusión general	109
Conclusiones generales	119
Agradecimientos	123

Introducción general

Introducción general

Los ecosistemas mediterráneos están afectados por diversas perturbaciones las cuales son consecuencia del clima y de la acción humana que se desarrolla. Estas perturbaciones son cada vez más frecuentes e intensas, pudiéndose atribuir en distinta medida al cambio global, que incluye el climático y los del uso del suelo. Entre estas perturbaciones, pueden hallarse el fuego, la baja diversidad de especies plantadas, la invasión de especies exóticas agresivas, las condiciones de sustratos pobres...etc (Ansorena 1994, Terradas 1996). Consecuencia de esta combinación, los suelos pueden empobrecerse y degradarse perdiendo de esta manera las características físico-químicas. Por lo que es necesario desarrollar actuaciones enfocadas a una restauración ecológica del paisaje, dependiendo del grado de perturbación y de las superficies degradadas (Van Andel y Aronson 2006).

Entre las diferentes perturbaciones que afectan a la dinámica de los ecosistemas mediterráneos destaca el fuego. El fuego es una perturbación natural relativamente frecuente en las comunidades vegetales Mediterráneas (Rundel 1998, Trabaud et al. 1996), tanto en la parte occidental de la Cuenca Mediterránea, como en otras zonas de clima parecido (California, sur-este de Australia) (Terradas 1996). En los últimos años se ha producido un aumento en la importancia de los incendios forestales, con un espectacular incremento en su frecuencia (Terradas 1996), pero sobre todo, con la aparición de un fenómeno complejo y relativamente nuevo como son los incendios forestales de grandes dimensiones (Pausas y Vallejo 1999, Habrouk 2001). La superficie acumulada quemada anualmente en los países mediterráneos puede estimarse a más de 600 000 ha, lo que equivale a casi el doble que los años setenta (Le Houerou 1987). El empeoramiento de la situación es evidente en distintos países de la Cuenca Mediterránea, como Grecia (de 12.000 a 39.000 ha), Marruecos (de 2.000 a 3.100 ha) y España (de 50.000 a 208.000 ha) (Alexandrian et al. 1999). Estos grandes incendios pueden influir decisivamente en la capacidad de recuperación de la vegetación afectada por el mismo (Pausas 1999), especialmente en aquellas especies que carecen de mecanismos de recuperación después del fuego (banco de semillas o rebrotada) y cuya regeneración dependerá de la llegada de propágulos desde el perímetro del incendio (Ordoñez 2004). Así, la reiteración de grandes incendios puede poner en peligro la continuidad de muchas especies germinadoras, como es el caso de *Pinus nigra* en el NE de la Península Ibérica, de la que se ha detectado una drástica reducción de su área de distribución después de los grandes incendios de 1994 y 1998 (Espelta et al. 2002). En este contexto, se ha ido desarrollando una amplia conciencia sobre la necesidad de promover de manera activa la reconstrucción de estos paisajes forestales afectados por grandes incendios y en los que la regeneración natural de la especie dominante es nula (Espelta et al. 2003b). La

replantación forestal se ha mostrado como una herramienta importante que permite asegurar una buena calidad de la futura cubierta vegetal además de reducir la erosión, y mejorar los suelos degradados (Barberá et al. 2005), especialmente en áreas mediterráneas. Sin embargo, la dificultad técnica, y el costo creciente de las acciones de replantación forestal, obligan a extremar la planificación de estas actuaciones externas en las áreas quemadas en función de las condiciones ecológicas, y de la urgencia de las intervenciones (Espelta et al. 2003a).

Durante la fase de establecimiento en campo las plántulas pueden experimentar importantes periodos de estrés, sobretodo hídrico (Villar-Salvador 1998, Heiskanen y Rikala 2000), lo que puede limitar su supervivencia y desarrollo (South y Mexal 1984). Por este motivo, la calidad morfo-fisiológica de las plantas es un factor que juega un papel esencial en el éxito de un proyecto de replantación (Peñuelas y Cardeso 1993). Esta calidad representa un compendio de diferentes características destinadas a obtener un material de mayor resistencia una vez se encuentre en el monte, de modo que se favorezca la disminución del estrés sufrido por el manejo, se mejore la capacidad de arraigo, su óptimo crecimiento y, por lo tanto, la garantía de la replantación de la zona a largo tiempo (Villar-Salvador et al. 2000). La mayor parte de las investigaciones sobre la mejora de la calidad de planta se han centrado especialmente en el empleo de diferentes sustratos, fertilización, manejo del agua y cambios en la atmósfera del invernadero (Peñuelas y Cardeso 1993, Savé et al. 1998, Villar-Salvador 2004).

Entre los tratamientos aplicados para mejorar simultáneamente la productividad del vivero y la calidad de las plántulas destacan la elección del sustrato y las condiciones ambientales adecuadas para cultivarlas. El sustrato elegido debe presentar buenas características físico-químicas, ya que el desarrollo y el funcionamiento de las raíces están directamente ligados a las condiciones de aireación y contenido de agua, además de la directa influencia que el medio tiene sobre el suministro de nutrientes (Pastor et al. 1999). Asimismo, para potenciar el crecimiento y aumentar la producción de las plántulas, uno de los métodos utilizados es el aumento de la temperatura en el vivero, visto que su modificación puede estimular el desarrollo tanto de las raíces como de la parte aérea (Nobel et al. 1992, Landis et al. 1995) aunque esta respuesta puede variar de forma considerable de unas especies a otras (Savé et al. 1998). A menudo este aumento de la temperatura se acompaña con la aplicación de atmósferas enriquecidas en CO₂, para aumentar la producción viverística, acelerar el crecimiento de las plántulas, y mejorar su calidad (Landis et al. 1995, Saxe et al. 1998, Savé et al. 1998). Sin embargo, respecto a este tratamiento, se mantienen todavía algunas discrepancias sobre su efecto en el modelo de asignación de biomasa entre órganos. Así mientras que algunos estudios demuestran que el aumento de CO₂ estimula la parte aérea en detrimento de las raíces (De Luis et al. 1999), otros presentan evidencias a favor de un mayor desarrollo de la biomasa de la raíz (Tingey et al. 2000, Cortés et

al. 2004). La obtención de un sistema radical bien desarrollado en vivero puede proporcionar a la planta una ventaja importante una vez se encuentre frente a la sequía en campo, puesto que será capaz de prospectar volúmenes de suelo mayores y horizontes más profundos, garantizándose así el suministro de agua a la planta y por tanto manteniendo su actividad fisiológica positiva durante los periodos críticos (Van Den Driessche 1992, Simpson et al. 1994). Asimismo un mayor desarrollo radicular posibilitará una mayor removilización de reservas de nutrientes y de carbohidratos acumulados, favoreciendo la supervivencia y el crecimiento de las plántulas en campo (South 2000). La importancia de todos estos factores en la calidad final del material vegetal producido ha sido ampliamente estudiada en la producción hortícola intensiva de plantas ornamentales y frutales (Savé et al. 1998). Por el contrario existe escasa información sobre su incidencia en la producción de plántulas de especies forestales arbóreas destinadas a la repoblación de zonas más o menos degradadas. La producción de planta para repoblación se fundamenta excesivamente en la experiencia en las diferentes técnicas viverísticas de cada vivero, dándose la paradoja de que existan diferentes métodos de cultivo para una misma especie, sin que sea posible establecer cual es el más apropiado (Navarro et al., 1998). Esta improvisación en las técnicas de cultivo genera una importante variabilidad en el material vegetal entre viveros, e incluso entre años para un mismo vivero (Del Campo y Navarro, 2004a, b).

Además de la calidad de las plántulas, la respuesta al establecimiento en campo se verá afectada por multitud de factores entre los que destacan las características del suelo. En este sentido, se han estudiado diferentes técnicas para mejorar y acelerar la implantación de la vegetación, centradas en la mejora de las características del suelo basadas en la utilización de aditivos en campo (Savé et al. 1995, Alcañiz et al. 1996). En los últimos años, el uso de fangos de depuradora en la preparación de la instalación de la vegetación ha dado buenos resultados, en términos de mejorar la supervivencia y el crecimiento de plántulas (Valdecantos 2001, Jacobs et al. 2005). En la UE la reutilización de los productos de depuración de aguas en el medio forestal y en la recuperación de suelos se ha extendido en países como el Reino Unido, Holanda, Francia, Alemania e Italia. Se espera que la cantidad total de fangos de depuradora que se genera en Europa aumente en los próximos años, pasando de los 7,2 millones de toneladas de materia seca en el año 1998 a al menos 9,4 millones de toneladas en el año 2005 (EEA 2001). Este aumento supone un problema importante en cuanto a su eliminación y provoca la necesidad de buscar vías sostenibles y económicamente viables para su aprovechamiento. El uso de fangos de depuradora en el sector forestal es mucho menos común que en el sector agrícola. No obstante, esta práctica se ha incrementado considerablemente en los últimos años. En España se han realizado experiencias de este tipo en Galicia, Murcia, Madrid y en la Comunidad Valenciana (Navas et al. 1999, Martínez et al. 1999, Valdecantos 2001). Además existe una notable experiencia en la utilización de biosólidos en la restauración de canteras en Cataluña (Alcañiz et al 1996, Sort y

Alcañiz 1996). En zonas mediterráneas, considerando las peculiares características del medio forestal, la aplicación de estos residuos podría ser beneficiosa y viable en contextos como la forestación de tierras agrícolas y la repoblación de zonas degradadas. En los suelos degradados, no ha de extrañar que la aplicación de fangos de depuradora en forma de residuos sólidos urbanos o biosólidos pueda tener un efecto beneficioso sobre las propiedades físico-químicas del suelo (Navas et al. 1999), y el estado nutricional y crecimiento de las plántulas de las diferentes especies forestales introducidas (Navas et al. 1999). Aunque existe abundante información sobre el uso de fango concentrado, los fangos en estado de compost o secados térmicamente son materiales relativamente nuevos, y sus efectos en aplicaciones de campo son todavía poco conocidos (Naoum et al. 1998, Ojeda et al. 2003). En el caso del fango secado térmicamente el post-tratamiento permite: conservar una gran parte del nitrógeno, destruir los patógenos, y sobretodo eliminar la mayor parte del contenido de agua reduciendo el volumen y permitiendo un importante ahorro en los costes de transporte (Valdecantos 2004). Sin embargo, como posibles efectos negativos se han sugerido el elevado gasto energético en su producción así como una posible mayor toxicidad de los contaminantes presentes que en los lodos compostados o concentrados (Domene 2004). La posible existencia de estos efectos contradictorios sugiere la necesidad de aumentar la información sobre el impacto que puede tener la aplicación del fango térmico sobre la supervivencia y desarrollo de la vegetación en repoblaciones forestales.

Objetivos y estructura de la tesis:

Esta tesis tiene dos objetivos generales: I) en primer lugar pretende evaluar el efecto de diferentes técnicas de manejo de la plántula forestal en vivero con el fin de mejorar su calidad sin disminuir la productividad de estas instalaciones y ii) en segundo lugar se intenta valorar los posibles efectos de la aplicación de fango térmico en el establecimiento de estas plántulas, especialmente en zonas afectadas por grandes incendios forestales. La presente memoria está estructurada en cinco capítulos: los dos primeros capítulos recogen experimentos desarrollados en vivero, el tercero en una parcela experimental, mientras que el cuarto recoge un ensayo realizado a una escala espacial mayor, en una zona afectada por un gran incendio. Finalmente, en el capítulo quinto se presenta una síntesis y discusión general de los resultados obtenidos. Las especies sobre las que se han realizado estos ensayos son *Q. ilex*, *Q. humilis*, *P. pinaster* y *P. nigra*. La necesidad de actuar sobre grandes superficies, y la urgencia de proteger el suelo rápidamente para alcanzar el objetivo protector de la mayor parte de las repoblaciones, hizo que en el pasado se generalizara el empleo de especies de crecimiento rápido, básicamente del género *Pinus*. Actualmente, debido a la elevada recurrencia de incendios forestales, la repoblación con *Pinus* tiende a complementarse con la inclusión de especies rebrotadoras como *Quercus*, por su mayor potencial resiliencia ante este tipo de perturbaciones. Además en nuestro caso, la inclusión de

estas cuatro especies en el estudio permite realizar comparaciones del efecto de los tratamientos aplicados entre coníferas y planifolios (*Pinus* vs. *Quercus*) así como entre perennifolios y caducifolios (*Q. ilex* vs. *Q. humilis*).

A continuación se describen los objetivos de los diferentes capítulos que forman esta memoria:

Capítulo I: (*Efecto de la capacidad de retención de agua del sustrato en el patrón de crecimiento de 4 especies forestales mediterráneas*). La elección de un sustrato adecuado es una de las principales herramientas para conferir durante la fase de vivero una correcta calidad de las plántulas. En este contexto, en este experimento se evalúa la influencia de dos diferentes tipos de sustrato (turba y perlita) y sus combinaciones sobre el crecimiento, asignación de biomasa, potencial de crecimiento de nuevas raíces (RGP) y contenido de azúcares y almidón en las raíces, en plántulas de *Quercus ilex*, *Quercus humilis*, *Pinus pinaster* y *Pinus nigra*.

Capítulo II: (*Evaluación del incremento en la temperatura y CO₂ atmosféricos en vivero en el patrón de crecimiento de 4 especies forestales mediterráneas*). En este experimento se evalúa la aplicación de diferentes condiciones ambientales en vivero con el fin de mejorar tanto la productividad de estas instalaciones como la calidad de las plántulas producidas. En concreto, se estudia el efecto de un aumento en la temperatura mínima y de enriquecimiento atmosférico de CO₂ en el crecimiento, modelo de asignación de biomasa y potencial crecimiento de nuevas raíces en plántulas de cuatro especies arbóreas mediterráneas (*Quercus ilex*, *Quercus humilis*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*). Asimismo, se ha analizado también el efecto de estos tratamientos sobre las concentraciones de nitrógeno, discriminación isotópica foliar del carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y porcentaje de almidón y azúcares a nivel de hojas y raíces, visto que estos atribuidos fisiológicos pueden relacionarse con el potencial del desarrollo posterior de las plántulas en campo (Salifu y Timmer 2001).

Capítulo III: (*Efecto de la aplicación de fango térmico durante el establecimiento en campo de plántulas de Quercus ilex, Quercus humilis y Pinus nigra endurecidas previamente en vivero*). El empleo de fangos de depuradora frescos o compostados durante la preparación del terreno en programas de reforestación ha dado buenos resultados, promoviendo la supervivencia y el crecimiento de las plántulas establecidas. Sin embargo existe escasa información sobre el potencial uso de fangos secados térmicamente, aunque el menor volumen y peso de este preparado podría facilitar su aplicación en repoblaciones forestales. Por esta razón, en este experimento, se estudia el efecto de diferentes aplicaciones de fango térmico en una parcela experimental sobre las características del suelo y la supervivencia, crecimiento y modelo de asignación de biomasa en plántulas de *Pinus nigra*, *Quercus ilex* y *Quercus humilis*. Asimismo, se

ha evaluado la posible interacción entre esta respuesta a la aplicación fango y diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico de las plántulas previamente en vivero.

Capítulo IV: (*Respuesta de las plántulas de Pinus nigra y Pinus pinaster procedentes de diferentes condiciones ambientales en vivero a la aplicación de fango térmico y tubos protectores en la reforestación de una zona quemada*). Este capítulo incide también en el potencial uso del fango térmico para mejorar las características del suelo en programas de reforestación. Sin embargo, en este caso la aplicación de este compuesto se ha realizado en superficie y a un nivel espacial más importante, en áreas afectadas por grandes incendios sobre plántulas de *Pinus pinaster* y *Pinus nigra*. Intentando combinar las experiencias desarrolladas en el capítulo 2 y en el 3, se ha valorado también la interacción de este tratamiento con los efectos de la temperatura y del enriquecimiento atmosférico en CO₂ previamente en vivero. El efecto de estos factores se ha evaluado sobre la supervivencia y crecimiento de las plántulas.

Capítulo V: (*discusión general*). En este capítulo se discuten conjuntamente todos los resultados obtenidos en los diferentes apartados. A partir de esta discusión se intenta establecer algunas propuestas y recomendaciones en cuanto a la aplicación de las técnicas ensayadas para el cultivo y establecimiento de las plántulas de las especies estudiadas, intentando valorar la opción más económica y eficaz para la supervivencia, el desarrollo y el crecimiento del material vegetal.

Bibliografía

Ansorena J (1994) Sustratos. Propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 172p.

Alcañiz JM, Conellas L, Pujolà M (1996) Manual de restauració d'activitats extractives amb fangs de depuradora: recuperació de terrenys marginals. Junta de Sanejament, Generalitat de Catalunya, Barcelona, 69p.

Alexandrian D., Esnault F. y Calabri G. 1999 Incendios forestales en el área del Mediterráneo. Los Bosques del Mediterráneo. Unasyva, N°. 197, Roma

Barberá GG, Martínez FF, Álvarez RJ, Albaladejo J, Castillo V (2005) Short and intermediate-term effects of site and plant preparation techniques on reforestation of a Mediterranean semiarid ecosystem with *Pinus halepensis* Mill. New Forest 29:177-198

Cortes P, Espelta JM, Savé R, Biel C (2004) Effects of nursery CO₂ enriched atmosphere in the germination and seedling morphology of two Mediterranean oaks with contrasting leaf habit. *New Forests* 28:79-88

De Luis I, Irigoyen JJ, Sánchez-Díaz M (1999) Elevated CO₂ enhances plant growth in droughted N₂-fixing alfalfa without improving water status. *Physiologia Plantarum* 87:84-89

Del Campo AD, Navarro RM (2004a) Calidad de lotes comerciales de encina (*Quercus ilex* L. Subsp. *ballota* (Desf) Samp.) Evaluación de su respuesta en campo. Reunión del grupo de repoblaciones forestales CEMACAM-Murcia 17-19 de noviembre 2003-Sociedad Española de Ciencias Forestales 17: 35-42

Del Campo AD, Navarro RM (2004b) Calidad de lotes comerciales de acebuche (*Olea europea* var. *Sylvestris* Brot.) Evaluación de su respuesta en campo. Reunión del grupo de repoblaciones forestales CEMACAM-Murcia 17-19 de noviembre 2003-Sociedad Española de Ciencias Forestales 17: 43-49

Domene X (2004) Avaluació de la utilitat del bioassaig amb el col·lèmbol *Folsomia candida* en l'estimació del potencial ecotoxicològic per als sòls dels fangs de depuradora. Treball de recerca. Universitat Autònoma de Barcelona

EEA, Environment in the European Union at the Turn of the Century. EEA, (Copenhague: European Environmental Agency, 1999. Internet: <http://www.eea.eu.int> (consulta 1-12-2001).

Espelta JM, Rodrigo A, Habrouk A, Meghelli N, Ordoñez JL, Retana J (2002) Land changes, natural regeneration patterns and restoration practices after a large wildfire in NE Spain: Challenges for fire ecology and landscape restoration. *en*: L. Trabaud y R. Prodon (editores). *Fire and Biological processes*. Backhuys, Leiden. 315-324

Espelta JM, Retana J, Habrouk A (2003a) An economic and ecological multi-criteria evaluation of restoration methods to recover burned *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Forest Ecology and Management* 180:185-198

Espelta JM, Retana J, Habrouk A (2003b) Resprouting patterns alter fire and response to stool clearing of two coexisting Mediterranean oaks with contrasting leaf habit on two different sites. *Forest Ecology and Management* 179: 401-414

Habrouk A (2001) Regeneración natural y restauración de la zona afectada por el gran incendio del Bages y Berguedà de 1994. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona

Heiskanen J. y Rikala R. (2000) Effect of peat-based container media on establishment of Scots pine, Norway spruce and silver birch seedlings after transplanting in contrasting water conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15(1): 49-57

Jacobs DF, Salifu KF, Seifert JR (2005) Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management* 214:28-39

Landis TD, Tinus RW, McDonalds SE, Barnett JP (1995) *The Container Tree Nursery Manual. Volume One. Nursery Planning, Development, and Management. Agric. Handbook*

674. Washington, DC, U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 145p.

Le Houerou HN (1987) Vegetation wildfires in the Mediterranean basin: evolution and trends. *Ecologia Mediterranea* 13:13-24

Martínez F, Castillo V, Bago D, Roldán A, Albaladejo J (1999) Reforestación en áreas mediterráneas semiáridas. Evaluación de nuevas técnicas: adición de residuos urbanos. *Foresta* octubre 136-139

Naoum C, Zorpas A, Savvides C, Haralambous KJ, Loizidou M (1998) Effects of thermal and acid treatment on the distribution of heavy metals in sewage sludge. *Journal of Environmental Science and Health Part Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 33:1741-1751

Navarro R, Del campo AD, Alejano R, Álvarez L (1998) Caracterización de calidad final de planta de encina (*Quercus ilex* L.), alcornoque (*Quercus suber* L.), algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.) y acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris* L.) en cinco viveros en Andalucía. Comunidad Europea. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. D.G. de Investigación y Formación Agraria. Servicios de Publicaciones y Divulgación. *Informaciones Técnicas* 53: 60p.

Navas A, Machín J, Navas B (1999) Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). *Bioresource Technology* 69:199-205

Nobel PS, Alm DM, Cavelleir J (1992) Growth respiration, maintenance respiration and structural-carbon costs for roots of three desert succulents. *Functional Ecology* 6:79-85

Ojeda G, Alcañiz JM, Ortiz O (2003) Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation and Development* 14:563-573

Ordoñez JL (2004) Análisis y modelización del reclutamiento de *Pinus nigra* en zonas afectadas por grandes incendios. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona

Pastor JN, Burés S, Savé R, Marfà O, Pages JM (1999) Transplant adaptation in landscape ornamental shrubs in relation with substrate physical properties and container sizes. *Acta Horticulturae* 481:137-144

Pausas JG, Vallejo R (1999) The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In: Chuvieco, E. (ed.), *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, Springer Verlag, Berlin 3-16

Pausas JG (1999) Response of plant functional type to changes in the fire regime in Mediterranean ecosystems: A simulation approach. *Journal of Vegetation Science* 10: 717-722

Peñuelas JL, Cardeso MJ (1993) Los substratos en la producción de planta forestal. *Montes* 32

Rundel (1998) Landscape disturbance and biodiversity in Mediterranean type ecosystems. *Ecol. Studies*. 136. Springer-Verlag.

Salifu KF, Timmer VR (2001) Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply. *Soil Science Society of America* 65: 905-913

Savé R, Pery M, Marfa O, Serrano L (1995) The effect of hydrophilic polymer on plant water status and survival of transplanted pine seedlings. *HortTechnology* 5 (2): 141-143

Savé R, De Herralde F, Retana J, Espelta JM, Biel C (1998) Effect of elevated CO₂ on plant productivity and hardening under Mediterranean conditions. *Proc. The Earth's changing land GCTE-LUCC Open Science Conference on Global Change*. Barcelona. Spain

Saxe H, Ellsworth DS, Heath J (1998) Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytologist* 139:395-436

Simpson DG, Thompson CF, Sutherland CD (1994) Field performance potential of interior spruce seedlings: effect of stress treatments and prediction by root growth potential and needle conductance. *Canadian Journal Forest Research* 24:576-586

South D, Mexal JG (1984) Growing the best seedling for reforestation success. *Forestry Departmental. Series nº 12*. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University

South D (2000) Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. *Forestry and wildlife Research Series Nº 1*. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University, Alabama. 12p.

Sort X, Alcañiz JM (1996) Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries. *Land Degradation and Development* 10:3-12

Terradas J (1996) *Ecología del Foc*. Edicions Proa, Barcelona. 63p.

Tingey DT, Phillips DL, Johnson MG (2000) Elevated CO₂ and conifer roots: effects on growth, life span and turnover. *New Phytologist* 147:87-103

Trabaud L, Martínez-Sánchez JJ, Ferrandis P, González-Ochoa AI, Herranz JM (1996) Végétation épigée et banque de semences du sol: leur contribution á la stabilité cyclique des pinèdes mixtes de *Pinus halepensis* et *pinus pinaster*. *Canadian Journal of Botany* 75:1012-1021

Van Andel J and Aronson J (2006) *Restoration Ecology*. Blackwell Publishing, Oxford. 319p.

Valdecantos A (2001) Aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la repoblación de zonas forestales degradadas de la Comunidad Valenciana. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante

Valdecantos A, Fuentes D, Cortina J (2004) Utilización de biosólidos en la restauración de ecosistemas mediterráneos. *Avances en el estudio de la gestión del monte Mediterráneo* ISBN: 84-921259-3-4, Valencia, Fundación CEAM: 313-344

Van Den Driessche R (1992) Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen and potassium treatments. *Canadian Journal Forest Research* 22:740-748

Villar-Salvador P, Planelles R, Oliet J, González M (1998) Efecto de diferentes niveles de estrés hídrico y de su duración en las relaciones hídricas de plántulas de *Quercus ilex*. In Proc. 4th Symposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas, Spanish Soc. of Plant Physiol. , Murcia, Spain 65-68

Villar-Salvador P, Peñuelas Rubira JL, Carrasco I (2000) Influencia del endurecimiento por estrés hídrico y la fertilización en algunos parámetros funcionales relacionados con la calidad de la planta de *Pinus pinea*. *Actas del 1er Simposio del pino piñonero* 1:211-218

Villar-Salvador P, Planelles R, Oliet J, Peñuelas Rubira JL, Jacobs DF, González M (2004) Drought tolerance and transplanting performance of holm oak (*Quercus ilex*) seedlings after drought hardening in the nursery. *Tree Physiology* 24:1147-1155

Capítulo 1

Efecto de la capacidad de retención de agua del sustrato en el patrón de crecimiento de 4 especies forestales mediterráneas.

Introducción

En cultivos en vivero, con planteamientos agronómicos propios de la horticultura intensiva, la calidad de la planta para trasplante dependerá de diferentes variables. En primer lugar y fundamentalmente, del tipo de sustrato que se utilice para cultivarlas y, en particular, de sus características físico-químicas, ya que además de tener una influencia directa sobre el suministro de nutrientes necesarios para las plantas, el crecimiento y el funcionamiento de las raíces está directamente ligado a las condiciones de aireación y contenido de agua del sustrato (Bell 1992, García et al. 2001, Pastor et al. 1999, 2003). Antes del cultivo, la caracterización y selección previa de las propiedades físicas más adecuadas del sustrato es esencial, ya que si éstas características son inadecuadas, difícilmente se podrán mejorar una vez que se han establecido las plantas (Cabrera 1999). La experiencia en viveros que utilizan diferentes sustratos como medio de cultivo demuestra que el propio manejo del sustrato es una de las claves para obtener elevadas producciones de plantas de calidad (Pastor et al. 2002, Savé et al. 2002). El sustrato debe ser suficientemente pesado para mantener a la planta en posición vertical y al mismo tiempo no dificultar la manipulación del material vegetal (Jiménez y Caballero 1990). Generalmente, para encontrar un sustrato con las mejores características físico-químicas posibles, hay que acudir a una combinación de componentes orgánicos (turba, sub-productos de madera) y inorgánicos (arena, perlita, vermiculita). Según Lemaire (1989), los sustratos con una estructura granulométrica (arena-perlita) deforman más las raíces que los sustratos con estructura fibrosa (turba-vermiculita), de manera que al mezclar un sustrato fibroso como la turba con otro sustrato granulométrico como la arena, disminuye la resistencia a la penetración de las raíces y la tortuosidad de las mismas. Asimismo, diferentes estudios han demostrado que el número y las ramificaciones de las raíces dependen directa y positivamente de la humedad que mantiene el medio de cultivo (Vartanian 1975).

El tipo de sustrato en el que las plantas son cultivadas en el vivero es un elemento esencial para potenciar el sistema radical, dotándolo sobretodo, de una gran capacidad para la absorción, transporte de agua y capacidad de almacenamiento y removilización de reservas en el momento de la plantación (Estaun et al. 1997, Pastor et al. 2002). Así, la proporción entre el tamaño de la parte aérea y la radical, el peso seco radicular y la cantidad de carbohidratos acumulados son algunos de los atributos morfológicos de calidad más frecuentes y que proporcionan más información sobre la posible respuesta de la planta al establecimiento (Burdett 1990, Puttonen 1997, South 1999). En este sentido, mientras que la relación entre biomasa aérea y subterránea es un buen indicador de la capacidad de la planta de hacer frente al estrés hídrico, especialmente en climas secos (Lloret et al 1999), la cantidad de reservas acumuladas en el sistema radicular se relaciona con la capacidad de las plantas de removilizar nutrientes y carbohidratos durante la

crítica fase de post-transplante (Salifu y Timmer 2001). Los nutrientes y sobretodo los azúcares acumulados en vivero gracias al manejo agronómico son fundamentales para el arraigo post-transplante, removilizándose cuando la actividad fotosintética esta interrumpida o ralentizada por el estrés hídrico (Marshall 1985, Savé et al. 1998). Además de la arquitectura y reservas acumuladas en las plantas durante la fase de vivero, el potencial de desarrollo de nuevas raíces será un elemento clave para asegurar el posterior desarrollo (supervivencia y crecimiento) de las plántulas en campo (Ritchie y Dunlap 1980, Simpson et al. 1994, Ritchie et al. 1985, Fonseca 1999). El potencial crecimiento de nuevas raíces depende en gran medida de las condiciones de cultivo en vivero (Ferret y Kreh 1986, Van Den Driessche 1992), especialmente de diferentes condiciones determinadas por la naturaleza del sustrato como: el estrés hídrico sufrido (Villar Salvador et al. 2004), y de la posterior profundidad de la plantación de las plántulas en el campo (Domínguez et al. 2000). Aunque algunos autores ponen en cuestión la eficacia de la medida del potencial de crecimiento radical (root growth potencial: RGP) como predictor del desarrollo en campo (Burdett 1987), la mayoría de los trabajos encuentran una correlación positiva entre dicho índice y la supervivencia y crecimiento de las plantas post-transplante (Burdett et al. 1983, Ritchie et al. 1985, Mattsson 1991, Simpson y Vyse 1995).

Pese a la indudable importancia del tipo de sustrato utilizado durante la fase de desarrollo en vivero sobre la calidad de las plantas de especies forestales arbóreas destinadas a repoblación, la información es todavía escasa para la mayoría de especies Mediterráneas (Peñuelas y Cardeso 1993, Valdecantos 2001). Con el objetivo de mejorar este conocimiento para cuatro de las especies más ampliamente utilizadas en programas de reforestación en la Cuenca Mediterránea (*Quercus ilex*, *Quercus humilis*, *Pinus pinaster* y *Pinus nigra*) se ha evaluado, en condiciones de vivero, el efecto de varios sustratos (turba y perlita) de granulometrías y capacidades de retención de agua diferentes sobre: el crecimiento, patrón de asignación de biomasa, contenido radicular de azúcares y almidón, y potencial de crecimiento de nuevas raíces (RGP) en plántulas de estas especies.

Material y métodos

Diseño experimental

Para este estudio se utilizaron 320 plántulas de una sabia de *Q. ilex*, *Q. humilis*, *P. pinaster* y *P. nigra* cultivadas en contenedores de 250 cm³ con turba procedentes del vivero comercial “la Fageda” (Olot-Girona). En junio 2002, las plántulas fueron trasladadas a un invernadero del IRTA (Cabrils-Barcelona) donde recibieron un riego total de 2.7 litros por planta durante 286 días, lo que equivale a una pluviometría de aproximadamente 820 mm año⁻¹. Al inicio del experimento, las plántulas tenían respectivamente una altura y diámetro medio de 13.3 ± 0.4 cm y 3.1 ± 0.1 mm en

P. nigra, 34.9 ± 0.8 cm y 4.2 ± 0.4 mm en *P. pinaster*, 21.1 ± 0.7 cm y 4.5 ± 0.1 mm en *Q. ilex* y 21.5 ± 0.6 cm y 3.9 ± 0.1 mm en *Q. humilis*. En este momento 20 plántulas de cada especie se plantaron en contenedores de 3 L y 17 cm de diámetro con cuatro sustratos diferentes (Ver esquema 1-A), con el fin de estudiar el crecimiento, patrón de asignación de biomasa, contenido radicular de azúcares y almidón, y potencial de crecimiento de nuevas raíces de las plantas mediante la técnica del RGP (Root Growth Potential) (Burdett et al. 1983, Ritchie et al. 1985, Simpson et al. 1994).

Los cuatro sustratos utilizados fueron:

- 100 % de turba (T): turba tamizada de la marca "Florator". Esta turba presenta un pH cercano a 4,5 y por este motivo su acidez fue neutralizada con 3.7g/l^{-1} de carbonato de calcio para aumentar el pH a 6,5-7.
- 100 % perlita (P): tipo A13 (Europerlita S.A) con una granulometría de 3-5 mm, una densidad aparente de $0,12\text{ g.cm}^3$ y un pH entre 7-7,5.
- 30% perlita-70% turba (Tp): una mezcla del 70% de turba tamizada y de 30% de perlita, con un pH cercano a 7.
- 70% perlita-30 turba (Pt): una mezcla del 30% de turba tamizada y de 70% de perlita, con un pH cercano a 7.

Para cada tipo de sustrato se analizaron tres replicas de las que se determinaron las siguientes propiedades físicas: espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), contenido de agua de reserva (BC), contenido de agua fácilmente disponible (EAW) y contenido de agua difícilmente disponible (NAW). Todos estos parámetros se obtuvieron a partir de la curva de liberación de agua o curva característica desarrollada por De Boodt et al. (1974).

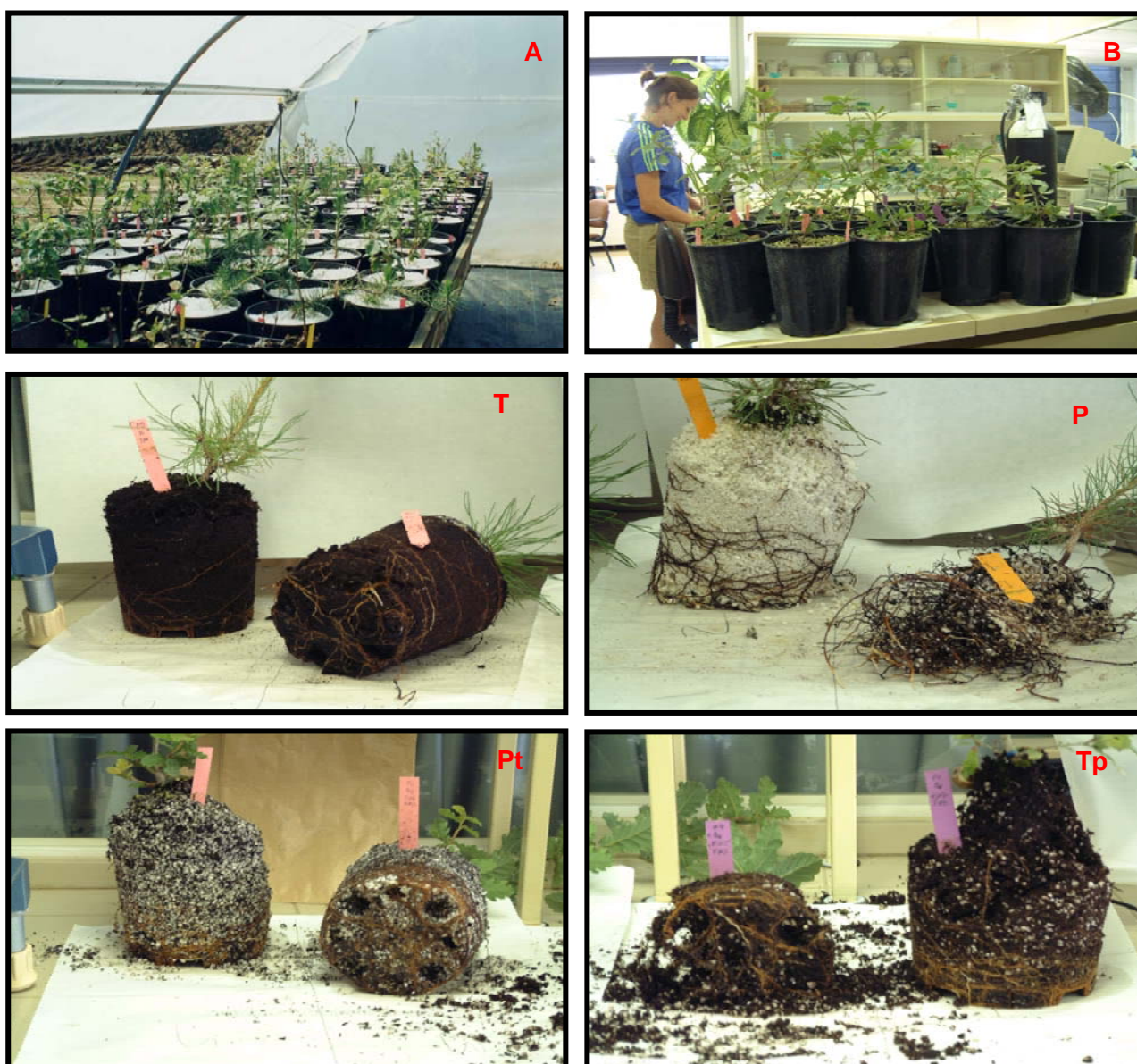
Una vez las plántulas recibieron los diferentes tratamientos de sustrato ensayados recibieron un riego por micro aspersion equivalente a 504mm durante todo el experimento que duró 104 días (abril a julio). En todos los casos se fertilizó en cada riego mediante una solución nutritiva (1:0,11:1,25(N: P₂O₅:K₂O), pH= 6,5). En marzo de 2003, al inicio del experimento se midió la altura y diámetro de todas las plantas. A finales de julio 2003, se eligieron al azar 10 plántulas de cada especie (*Q. ilex*, *Q. humilis*, *P. pinaster*, *P. nigra*) y cada tratamiento (P, T, Tp, Pt) (Ver esquema 1-B). De estas plántulas se midió la altura, el diámetro y el número de hojas (*Q. ilex* y *Q. humilis*). A partir de estas variables se calcularon las tasas de crecimiento relativo en altura (RGR altura = $\ln(\text{Altura final}) - \ln(\text{Altura inicial}) / \text{tiempo transcurrido}$) y diámetro (RGR diámetro = $\ln(\text{Diámetro final}) - \ln(\text{Diámetro inicial}) / \text{tiempo transcurrido}$). Posteriormente, se separó la biomasa de los diferentes órganos: raíces, tallo, hojas, y se realizó la medida del crecimiento potencial de las

raíces (RGP: Root Growth Potential) en diez plantas por especie y tratamiento. Esta técnica consiste en hacer crecer las plántulas en un sustrato de perlita durante un cierto tiempo, para después desenterrarlas y medir la capacidad de producción de nuevas raíces (s.e. fracción de raíces que invaden el sustrato de perlita desde el cepellón original). Esta medida se realizó arrancando la raíz con mucho cuidado para evitar romperla y contando y separando todas las raíces nuevas mayores de 1 cm que sobresalían del cepellón original y ocupaban sustrato (Ver esquema 1-T,P,Pt,Tp). De estas nuevas raíces se midió su longitud total con un aparato Digital Image Analysis System (Delta Device, Cambridge, England), antes de secarlas a 70 °C para obtener el peso seco. Por lo que respecta a las raíces iniciales (anteriores al experimento), se lavaron cuidadosamente y después se determinó su peso seco (70°C en estufa hasta obtener un peso constante). Estas medidas se complementaron con la determinación de diferentes índices de morfología y asignación de biomasa: relación parte aérea-parte subterránea (biomasa de raíces/biomasa aérea R/S), cociente del peso de la raíz (biomasa raíz/biomasa total RWR), cociente del peso de las hojas (biomasa hojas/biomasa total: LWR). Con el objetivo de determinar el contenido de reservas, se analizó la composición de azúcares y almidón de las muestras secas de las raíces. Esta medición se realizó mediante la técnica de espectrometría de reflectancia del infrarrojo cercano (near-infrared reflectance spectrophotometer NIRSystems 6500, Foss NIRSystems, Raamsdonksveer, The Netherlands) descrita por Card et al. (1988), McLellan et al. (1991), Joffre et al. (1992). Para ello las muestras de raíces fueron molidas finamente con un molino (IKA modelo MFC N°.KB15-IP21). Debido al pequeño tamaño de las raíces, se mezclaron 2 muestras de raíces de plantas de la misma especie y del mismo tratamiento. En total se obtienen cinco replicas diferentes para el caso de las raíces iniciales. Por lo que respecta a las raíces nuevas y debido su tamaño aun más pequeño se mezclaron 3 muestras de raíces de plantas de la misma especie y del mismo tratamiento obteniendo en total tres replicas diferentes.

Análisis estadísticos

La comparación de las diferentes propiedades físicas de los diferentes tipos de sustratos (P, T, Tp, Pt: EAW (agua fácilmente disponible), CA (capacidad de aireación), NAW (agua difícilmente disponible), EPT (espacio poroso total) y BC (agua de reserva) fue analizado mediante un ANOVA de un factor. El análisis de los efectos de los factores especie (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) y sustrato (P, T, Tp, Pt) sobre el crecimiento, patrón de asignación de biomasa y variables morfológicas de las plántulas se llevo a cabo mediante un ANOVA de dos factores. Para valorar el efecto de estos dos tratamientos experimentales sobre el potencial de crecimiento de nuevas raíces (número, longitud y biomasa) se realizó un ANOVA de dos factores, utilizando además como covariable la biomasa de las raíces iniciales anteriores al experimento. Finalmente, la

valoración del efecto sobre las reservas de carbohidratos no estructurales (almidón y azúcares) de los factores especie, sustrato y tipo de raíz (raíces iniciales, raíces nuevas) se llevo a cabo mediante un ANOVA de tres factores. En todos los análisis los valores de significación fueron corregidos utilizando el método secuencial de Bonferroni (Rice 1988). Todos los análisis estadísticos realizados en este estudio se efectuaron con el programa estadístico StatView (SAS Institute Inc. 1999).



Esquema 1: Plántulas en las instalaciones de los viveros de IRTA (A), y en el laboratorio (B), muestras de raíces en diferentes sustratos de turba (T), Perlita (P), Perlita-Turba (Pt) y Turba-Perlita (Tp).

Resultados

Los diferentes sustratos utilizados mostraron diferencias en cuanto al volumen de agua retenida, de manera que la retención de agua en los sustratos que contenían turba fue mayor en comparación con aquellos en los que dominaba la perlita (Figura 1). Un punto esencial en la Figura 1 es el cruce de las dos curvas de los sustratos Tp y Pt. El sustrato Tp mostró un volumen de agua más alto que Pt hasta el punto de cruce (-15hPa), mientras que después fue el sustrato Pt que mostró un volumen de agua más alto en comparación con Tp hasta (-100hPa). Este punto de cruce nos indica que el volumen de agua es igual al volumen de aire en los dos sustratos (De Boodt 1975). Como era de esperar después de observar las curvas de retención de agua, los cuatro sustratos mostraron unas diferencias significativas en el contenido de agua fácilmente disponible (EAW), la capacidad de aireación (CA) y el volumen de agua difícilmente disponible (NAW) (Tabla 1). Tal y como se indica en la Tabla 2, los valores de de agua fácilmente disponible son más altos dónde domina la turba (sustratos T y Tp), mientras que los mayores valores de capacidad de aireación se obtiene cuando aumenta la presencia de perlita (sustratos P y Pt). Por lo que se refiere a la cantidad de agua difícilmente disponible, el sustrato perlita mostró unos valores significativamente más bajos, en comparación con los otros sustratos. Finalmente, los valores del espacio poroso total y del contenido de agua de reserva no mostraron diferencias entre los cuatro sustratos utilizados en este estudio.

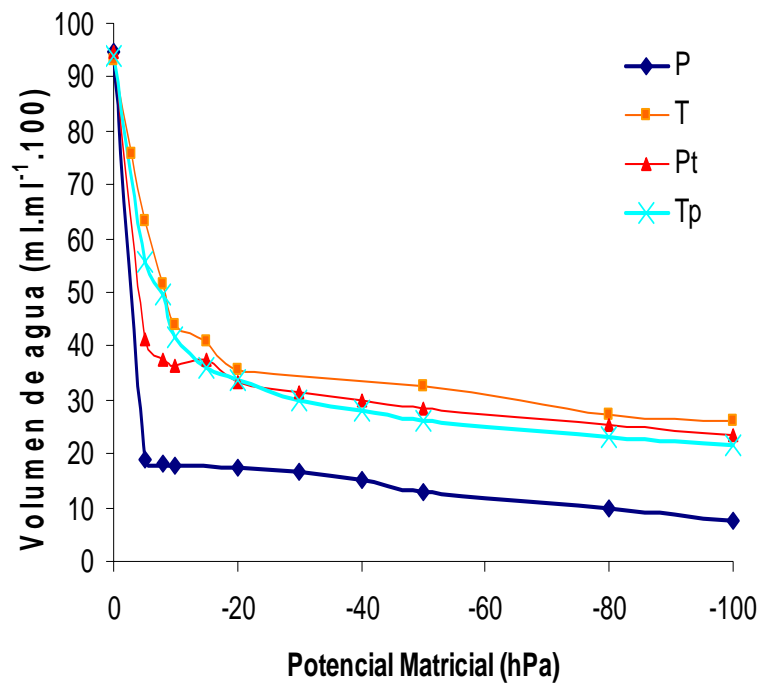


Figura 1 Curva de absorción de agua del sustrato. Representación de acuerdo con el modelo analítico de Van Genuchten (1980).

Tabla 1 Valores F del test ANOVA de los efectos de los cuatro sustratos (P, Pt, Tp y T) sobre las principales propiedades físicas: agua fácilmente disponible (EAW), capacidad de aireación (CA), agua difícilmente disponible (NAW), espacio poroso total (EPT) y agua de reserva (BC). Se indican en negrita los factores significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni.

Fuente de variación	EAW	CA	NAW	EPT	BC
Sustrato	87.2	118.1	40.9	4.1	1.5

Tabla 2 Media \pm ES del agua fácilmente disponible (EAW), capacidad de aireación (CA), agua difícilmente disponible (NAW), espacio poroso total (EPT) y agua de reserva (BC) de los cuatro sustratos (T, P, Pt y Tp), calculados según el método De Boodt et al. (1974).

	EAW	CA	NAW	EPT	BC
Perlita	4.9 \pm 1.1 a	76.7 \pm 2.5 a	9.0 \pm 3.2 a	95.9 \pm 1.5 a	5.2 \pm 1.1 a
Turba	21.0 \pm 1.2 b	41.8 \pm 1.3 b	25.9 \pm 0.2 b	93.2 \pm 0.1 ab	4.4 \pm 0.0 a
Pt	7.9 \pm 0.3 c	58.4 \pm 0.9 c	23.4 \pm 0.4 b	94.8 \pm 0.3 a	5.1 \pm 0.1 a
Tp	15.5 \pm 0.1 d	52.6 \pm 0.5 d	21.8 \pm 0.3 bc	94.1 \pm 0.2 a	4.3 \pm 0.1 a

El crecimiento en diámetro y altura de las plántulas se vio afectado por los diferentes sustratos utilizados (Tabla 3), si bien existieron importantes diferencias entre las cuatro especies estudiadas (*Q. ilex*, *Q. humilis*, *P. pinaster*, *P. nigra*). El crecimiento en diámetro fue superior en el sustrato perlita y en sus dos combinaciones (Tp y Pt) respecto al uso de la turba (P = 0.11 \pm 0.01mm **a**, Pt = 0.13 \pm 0.01mm **b**, Tp = 0.12 \pm 0.01mm **ab**, T = 0.09 \pm 0.01mm **c**). Entre especies, el crecimiento en diámetro fue mayor en *P. nigra* (datos no mostrados). Respecto al crecimiento en altura, las plántulas del tratamiento turba fueron las que crecieron más en comparación con las de perlita y las de Tp y Pt que mostraron un crecimiento similar (P = 0.05 \pm 0.005 cm **a**, Pt = 0.07 \pm 0.006 cm **c**, Tp = 0.08 \pm 0.007 cm **c**, T = 0.10 \pm 0.008 cm **b**). La interacción sustrato x especie (Tabla 2) indicó un crecimiento en altura similar en todos los sustratos en *P. pinaster*, un mayor crecimiento en T en *P. nigra* y *Q. humilis*, y un mayor y similar crecimiento en T y Tp en *Q. ilex* (Figura 2).

Tabla 3 Valores F del test ANOVA de los efectos de las cuatro especie (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) y de los cuatro sustratos (P, Pt, Tp y T) sobre diversas variables morfológicas y de asignación de biomasa: crecimiento relativo en altura (RGR altura), crecimiento relativo en diámetro (RGR diámetro), biomasa de las hojas, biomasa del tallo, biomasa de raíces, root/shoot (R/S), root weight ratio (RWR), stem weight ratio (SWR), leaf weight ratio (LWR). Los factores significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	RGR diámetro	RGR altura	Biomasa hojas	Biomasa tallo	Biomasa raíces	R/S	RWR	SWR	LWR
Especie (E)	19.7	52.1	31.9	23.4	73.3	168.2	320.5	75.5	257.7
Sustrato (S)	8.5	18.8	1.8	4.2	7.3	9.2	9.4	1.5	9.7
E x S	2.1	5.5	0.8	1.5	1.7	3.0	1.6	1.6	1.2

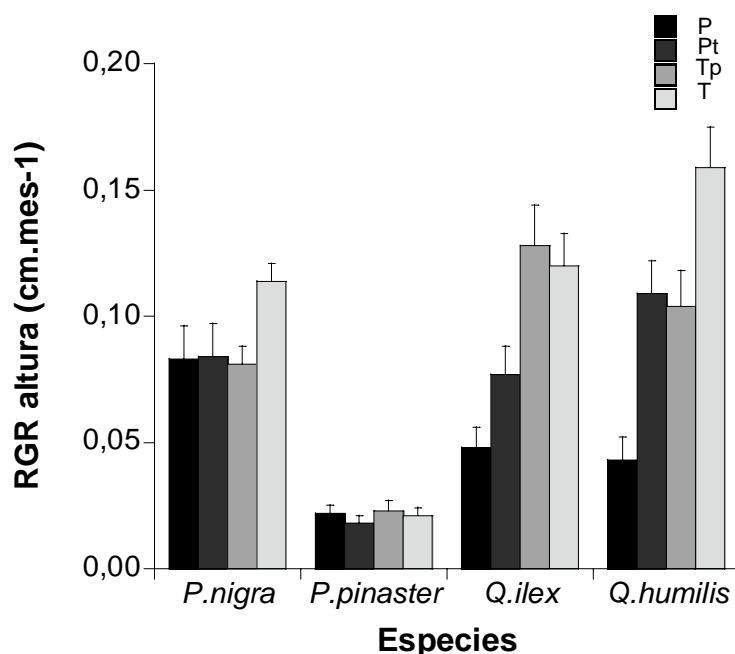


Figura 2. Media + ES del crecimiento relativo en altura en plántulas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* en los cuatro sustratos ensayados (P, Pt, Tp y T).

Las diferentes combinaciones de turba y perlita influyeron en la morfología y repartición de biomasa de las plántulas, especialmente en el sistema radical (Tabla 3). Las plántulas que crecieron en los sustratos con una mayor proporción de perlita (una menor cantidad de agua disponible) mostraron una mayor asignación de biomasa a raíces (Figura 3A) y una menor asignación a hojas (Figura 3B). Sin embargo, al tener en cuenta no solo la asignación general de

biomasa a ambos órganos, sino el balance entre biomasa subterránea y aérea (R/S), la interacción entre sustrato y especie (Figura 4) mostró que, mientras en la plántulas de pino (*P. nigra* y *P. pinaster*) el R/S fue similar en todos los sustratos, en las frondosas (*Q. ilex* y *Q. humilis*) el R/S fue superior en los sustratos con más perlita (P y Pt).

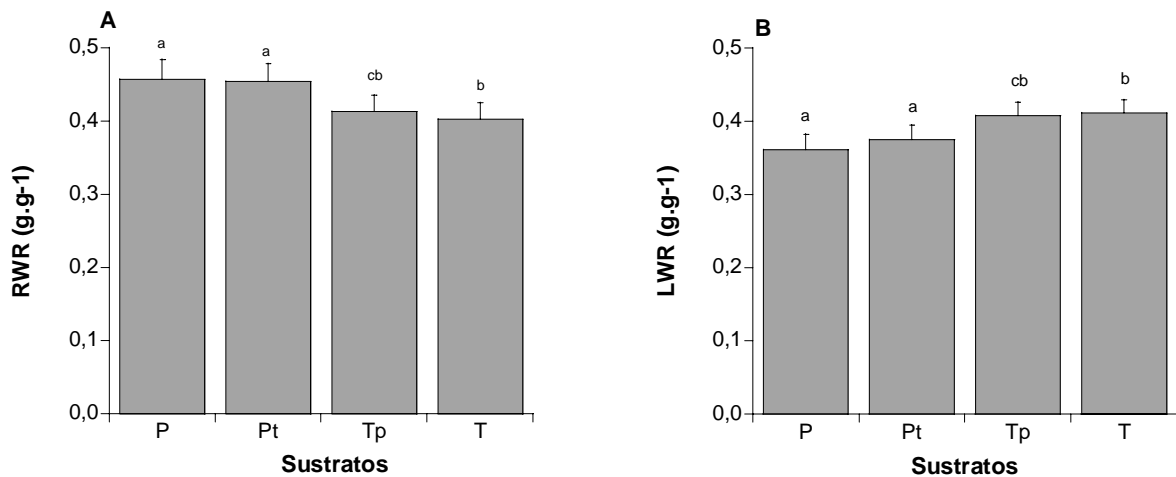


Figura 3. Media + ES del cociente del peso de la raíz (RWR) (A) y del cociente del peso de las hojas (LWR) (B) en los cuatro sustratos (P, Pt, Tp y T). Las distintas letras indican diferencias significativas entre los diferentes sustratos según el test de Fisher.

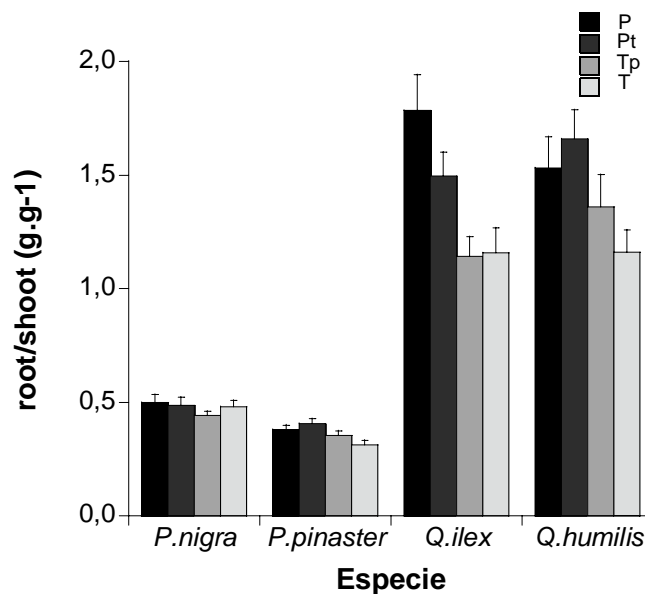


Figura 4. Media + ES del root/shoot en plántulas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* crecidas en los cuatro sustratos estudiados (P, Pt, Tp y T).

El análisis del potencial del crecimiento de las raíces de las plántulas (RGP: Root Growth Potential) señaló que al cabo de 4 meses, todas las plántulas produjeron nuevas raíces de un tamaño superior a 1 cm. En todas las especies y sustratos experimentados (representando diferentes disponibilidades hídricas), el número, la longitud y la biomasa de las nuevas raíces aumentó significativamente dependiendo de la biomasa anterior de raíces (Tabla 4). No obstante, la interacción sustrato x especie (Tabla 4) indicó que en el caso de *P. nigra*, el número y la longitud de las nuevas raíces fue mayor en los sustratos en los que abundaba la perlita (P y Pt), mientras que en las otras tres especies era mayor en los sustratos con más turba (sustrato T en *P. pinaster* y *Q. ilex*, y sustrato T y Tp en *Q. humilis*) (Figura 5).

Tabla 4 Valores F del test ANOVA de los efectos de las cuatro especies (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), de los cuatro sustratos (P, Pt, Tp y T) y de la biomasa de las raíces iniciales sobre el número, longitud y biomasa de raíces nuevas. En negrita se muestran los factores significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni.

Fuente de variación	Nº raíces nuevas	Longitud raíces nuevas	Biomasa raíces nuevas
Especie (E)	0.7	1.2	1.8
Sustrato (S)	1.1	1.6	0.6
Biomasa raíces iniciales (R)	15.5	17.4	19.1
E x S	5.0	3.6	2.2
E x R	3.1	4.4	4.6
S x R	0.1	0.7	0.7

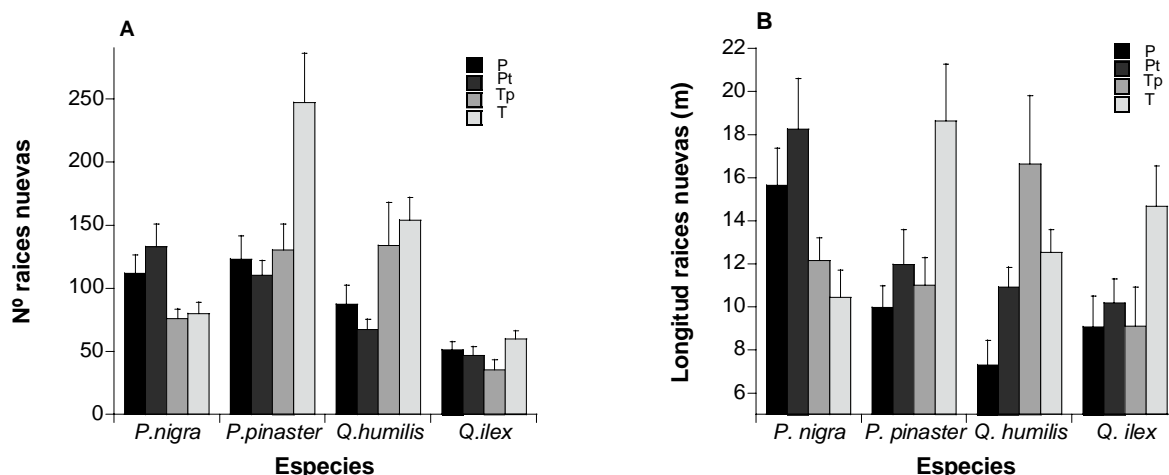


Figura 5. Media + ES del número de raíces nuevas (A) longitud de raíces nuevas (B) en las plántulas de las cuatro especies (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) en los cuatro sustratos (P, Pt, Tp y T).

Tal y como se muestra en la Tabla 5, el contenido de almidón y azúcares solubles en la raíces dependió significativamente de los sustratos en los que habían crecido las plántulas, de la especie y del tipo de raíces (raíces iniciales anteriores al experimento y nuevas raíces), con varias interacciones entre los distintos factores experimentales. El contenido en almidón fue mayor en los sustratos en los que dominaba la presencia de perlita (P y Pt), disminuyendo en aquellos con un mayor contenido en turba (P = 11.31 ± 0.41% **ab**, Pt = 11.57 ± 0.32% **a**, T = 10.39 ± 0.31% **c**, Tp = 10.71 ± 0.40 % **bc**).

Tabla 5 Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), sustratos (P, Pt, Tp y T) y el tipo de raíz sobre el porcentaje de almidón y azúcares. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	Almidón	Azúcares
Especie (E)	0.5	239.9
Sustrato(S)	5.3	16.4
Tipo Raíz (R)	49.8	185.2
E x S	1.8	10.5
E x R	33.7	24.0
R x S	0.6	16.7
E x S x R	1.7	2.2

En el caso de los azúcares solubles, además del efecto del tipo de sustrato se observó una interacción entre éste y la especie (Tabla 5, Figura 6). Mientras en las dos especies de pinos el contenido era mayor en los sustratos con mayor disponibilidad hídrica (T y Tp), en *Q. ilex* y *Q. humilis* el porcentaje era superior en las condiciones con menor disponibilidad hídrica (P). A su vez, en todos los sustratos ensayados se observó una interacción entre la especie estudiada y el tipo de raíces en el contenido de carbohidratos (Tabla 5), con un patrón casi opuesto de este efecto sobre el porcentaje de almidón y el de azúcares solubles (Figura 7). En *P. nigra* y *P. pinaster* no existieron diferencias en el contenido de almidón entre ambos tipos de raíces (Figura 7A-B) y se detectó en cambio un mayor porcentaje de azúcares en las raíces nuevas (Figura 7B). Las dos frondosas (*Q. ilex* y *Q. humilis*) presentaban un mayor contenido de almidón en las raíces iniciales al desarrollo del experimento (Figura 7A) y similar presencia de azúcares en ambos tipos de raíces (Figura 7A-B). Finalmente cabe destacar la interacción entre el tipo de sustrato y el tipo de raíces sobre el contenido de azúcares solubles: en todos los sustratos el contenido era mayor en las raíces nuevas aunque era en los sustratos con turba (T, Tp, Pt) donde se observaba una mayor diferencia entre los dos tipos de raíces en comparación con el sustrato únicamente con perlita (P) (Figura 8).

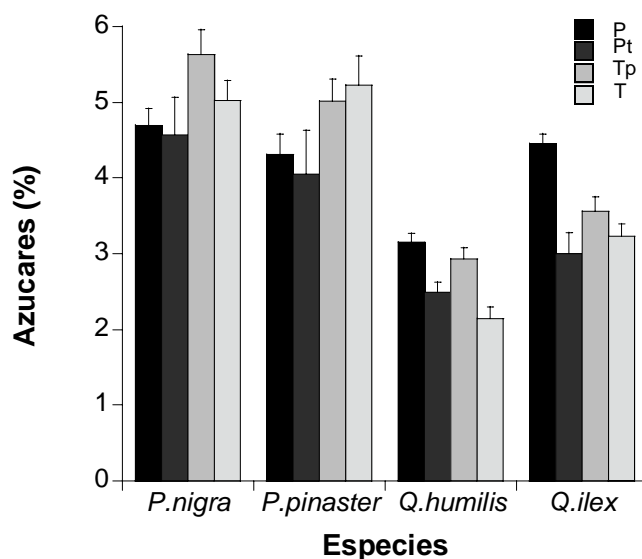


Figura 6. Media + ES del porcentaje de azúcares en raíces de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* en los sustratos (P, Pt, Tp y T).

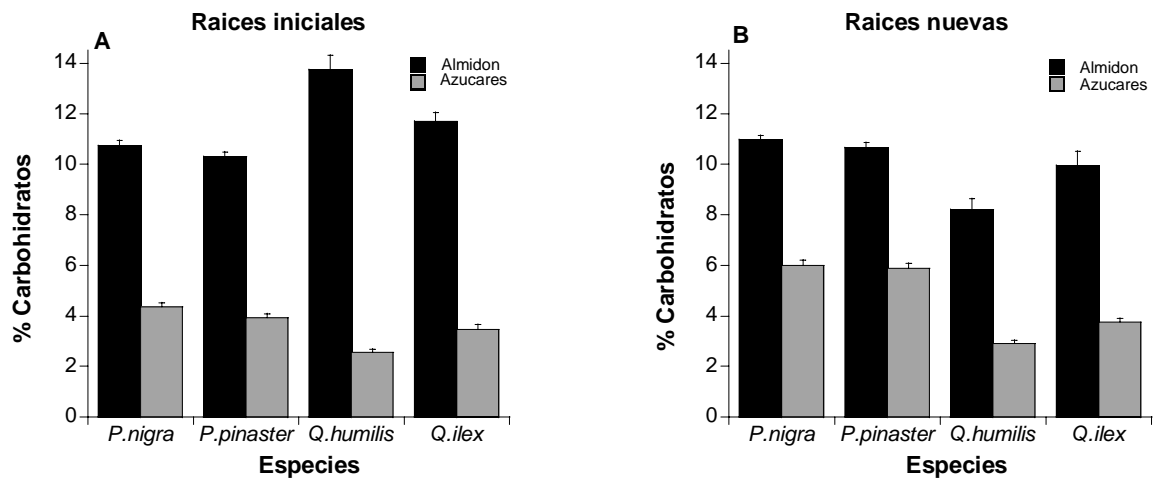


Figura 7. Media + ES del porcentaje de azúcares y almidón de las raíces iniciales (A) y de las raíces nuevas (B) raíces de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*.

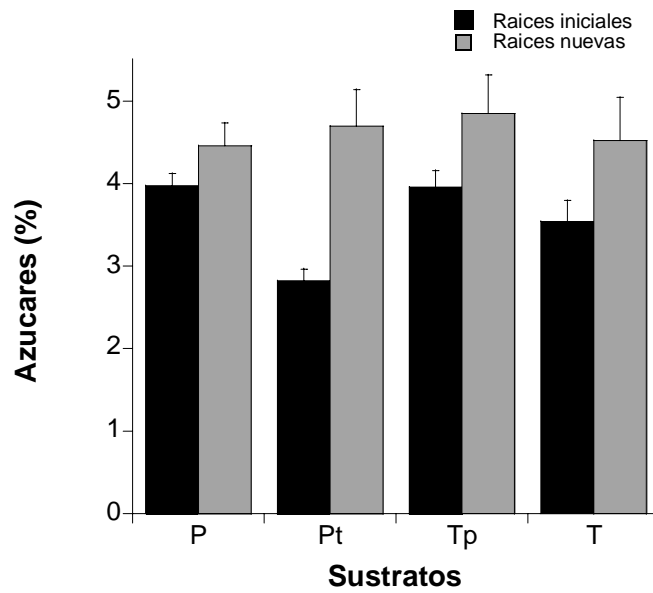


Figura 8. Media + ES del porcentaje de azúcares solubles en sustratos de (P, Pt, Tp y T) y en el tipo de raíces (raíces iniciales y raíces nuevas).

Discusión

Las características y la disponibilidad hídrica de los diferentes sustratos (Figura 1) ejercieron un efecto decisivo en el crecimiento y desarrollo de las plántulas. Las diferentes disponibilidades hídricas entre los cuatro sustratos generaron diferencias de crecimiento en altura y diámetro, de tal manera que se vio un efecto inverso sobre ambas variables; mientras aumentaba la altura en el sustrato turba, el diámetro aumentaba en el sustrato perlita y sus dos combinaciones (Pt y Tp). La estimulación del crecimiento en altura puede atribuirse a la respuesta de las plantas a moderados niveles de estrés hídrico, el cual permite el crecimiento pero varía su forma (Bradford y Hsiao 1982, Smith y Griffiths 1993). Los sustratos basados en perlita, que generaron menor disponibilidad hídrica, aumentaron el crecimiento de las plántulas de ambos *Quercus* en diámetro, la asignación de biomasa a raíces y en general el R/S de las plántulas en detrimento de la biomasa foliar. Esta mayor sensibilidad de las frondosas a la presencia en el sustrato de perlita y a las características de retención de agua que reporta este material, puede entenderse como un mecanismo de respuesta al mayor estrés hídrico generado en este sustrato (Figura 1, Van Genuchten 1980, Lemaire 1989). Contrariamente, tal y como muestran nuestros resultados los pinos resultaron ser especies más plásticas, con mayor facilidad de adaptarse al sustrato utilizado sin que este afectara a su R/S (ver también Valdecantos 2001). Todo esto pone en evidencia la diferencia de estrategia de crecimiento frente a condiciones ambientales limitantes entre las plántulas de pináceas y fagáceas, probablemente relacionado con la capacidad rebrotadora de estas últimas, lo que conlleva una asignación mayor de biomasa y recursos a raíces (Canadell y Rodá 1991).

En el caso de las especies rebrotadoras, el papel de las reservas en la aparición y crecimiento de nuevas raíces ha sido descrito como fundamental (Kozłowski y Pallardy 1997). El contenido de almidón y azúcares fue mayor en las plántulas de *Quercus* en comparación con las de *Pinus*, coincidiendo con los resultados aportados por otros estudios en los que se ha descrito que las especies rebrotadoras tienen cantidades considerablemente más elevadas de almidón en las raíces que las especies germinadoras (Royo et al. 2001). En todas las especies el contenido de almidón en raíces fue mayor en los sustratos donde dominaba la perlita, debido probablemente a la menor necesidad de movilizar reservas bajo estas condiciones en que se alcanzó un menor crecimiento en altura y un menor desarrollo foliar. Por lo que respecta a la concentración de carbohidratos en los dos tipos de raíces analizadas (raíces iniciales y desarrolladas posteriormente en el experimento de evaluación del potencial de desarrollo radicular), se observó una interacción entre los factores especie (*Quercus* o *Pinus*) y tipo de raíz, que puede atribuirse tanto a diferencias de crecimiento como a la diferente fenología en el desarrollo radicular en los

dos grupos. Tal y como muestran nuestros resultados, la concentración de almidón en las especies de *Quercus* fue significativamente más alta en las raíces iniciales, que en las raíces nuevas. Este resultado podría deberse tanto al hecho de que estas especies mostraban una preferente asignación de biomasa a raíces como al hecho de que las concentraciones de carbohidratos en especies de *Quercus* son relativamente altas durante el invierno, disminuyendo posteriormente en primavera, cuando se forman las nuevas raíces (Loescher et al. 1990, Schaberg et al. 2000, Latt et al. 2001). En cambio en estas especies el contenido de azúcares fue similar en ambos tipos de raíces, seguramente debido a que los valores de azúcares son bastante constantes durante la mayor parte del año, hasta que se inicia el segundo crecimiento de los *Quercus* en otoño (Latt et al. 2001). En los dos pinos, las concentraciones de azúcares fueron mayores en las raíces nuevas que en las iniciales (Figura 7A-B), debido probablemente a la gran actividad de estas raíces nuevas y a la gran necesidad de energía (azúcares) que se requiere para la construcción y el mantenimiento de tejidos finos nuevos. Estos resultados contrastan con otros estudios en los que se ha descrito mayores concentraciones de azúcares en la raíz principal en comparación con las laterales, de nueva formación, en plántulas de *P. palustris* crecidas en condiciones de vivero (Rodríguez-Trejo y Duryea 2003).

Durante las primeras fases de establecimiento post-transplante de las plantas, la biomasa de las raíces que colonizan el hoyo de plantación a corto plazo se suele correlacionar con la biomasa de las raíces presentes en el cepellón original (Seva et al. 1996, Valdecantos et al. 1996). Estos resultados sugieren que se podría utilizar la biomasa de raíces del cepellón como variable indicadora de la posterior colonización del suelo por las raíces de las plántulas introducidas y de su capacidad de sobrevivir al transplante, especialmente en relación al estrés hídrico (Tinus 1996, Simpson y Ritchie 1997). En nuestro caso, la longitud y el número de nuevas raíces dependieron significativamente de la biomasa de raíces iniciales. La capacidad de desarrollo de nuevas raíces aumentó especialmente en *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*, en las plántulas crecidas en los sustratos con una mayor disponibilidad hídrica (T y Tp) que es donde alcanzaron también un mayor desarrollo en altura. La positiva relación entre el crecimiento potencial de nuevas raíces (RGP) y el crecimiento en altura se ha atribuido a que a mayor altura se corresponde una mayor biomasa foliar, y por tanto una superior cantidad de fotosintetizados disponibles para estimular la elongación e iniciación de las raíces (Dewald y Feret, 1987), aunque este no parece ser el caso en las plántulas de *P. nigra* que mostraron un mayor desarrollo radicular en los sustratos dominados por perlita.

Los resultados obtenidos en nuestro experimento sugieren la posibilidad de mejorar la utilización de sustratos basados en la combinación de diferentes cantidades de turba y perlita durante la producción en vivero de plántulas de *Q. ilex*, *Q. humilis*, *P. nigra* y *P. pinaster*. El uso de una

mayor proporción de turba o perlita permite desarrollar plantas con diferentes características, previsiblemente utilizables en diferentes escenarios de restauración. Con una mayor aplicación del sustrato turba aumenta la disponibilidad hídrica y por lo tanto todas las especies aumentan su crecimiento en altura. Estas plántulas presentan una menor cantidad de reservas en el sistema radical, pero en cambio un mayor potencial de desarrollo de nuevas raíces (rapidez de arraigo), salvo en el caso de *P. nigra*. Por el contrario una mayor cantidad de perlita favorece el crecimiento en diámetro, una mayor acumulación de almidón en las raíces, pero un menor potencial (retraso) en el desarrollo radicular. Estas características se complementan con un aumento de la relación biomasa subterránea/biomasa aérea en ambos *Quercus* en este tipo de sustrato, manteniéndose en cambio similar en *P. nigra* y *P. pinaster*. Aunque los resultados obtenidos en este estudio deberían contrastarse a nivel de campo, en líneas generales sugieren un mayor potencial de utilización de las plántulas desarrolladas en sustratos ricos en turba para revegetaciones en condiciones ambientales y/o edáficas relativamente favorables o con prácticas de apoyo (ej. riegos puntuales), mientras que las características de las plántulas crecidas en sustratos con una mayor proporción de perlita serían más apropiadas para condiciones de restauración más difíciles (mayor aridez, menor calidad de suelo).

Bibliografía

Bell PR (1992) Green Plants their Origin and Diversity. Dioscorides Press. Portland, Oregon

Bradford KJ, Hsiao TC (1982) Physiological responses to moderate water stress. En: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H (eds.). Physiological Plant Ecology II, Water relations and carbon assimilation Encyclopedia of Plant Physiology, New series. SpringerVerlag, Berlin, 12B: 264-313

Burdett AN, Simpson DG, Thompson CF (1983) Root development and plantation establishment success. Plant and Soil 71:103-110

Burdett AN (1987) Understanding root growth capacity: Theoretical considerations in assessing planting stock quality by means of root growth tests. Canadian Journal Forest Research 17:768-775

Burdett AN (1990) Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. Canadian Journal Forest Research 20:415-427

Cabrera RI (1999) Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. Revista Chapingo - Serie Horticultura. 5(1): 5-11

Canadell J, Rodá F (1991) Root biomass of *Quercus ilex* in a montane Mediterranean forest. Canadian Journal Forest Research 21:1771-1778

Card DH, Peterson DL, Matson PA, Aber JD (1988) Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. Remote Sensing of Environment 26:123-147

De Boodt M, Verdonck O, Cappaert I (1974) Method for measuring the water release curve of organic substrates. Acta Horticulturae 37:2054-2062

De Boodt M (1975) Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. Annales de Gembloux 81:59-72

Dewald LE, Feret PP (1987) Changes in loblolly pine root growth potential from September to April. Canadian Journal Forest Research 17:635-643

Dominguez Lerena S, Carrasco I, Herrero Sierra N, Ocaña L, Nicolas JL, Peñuelas Rubira JL (2000) Las características de los contenedores influyen en la supervivencia y crecimiento de las plantas de *Pinus pinea* en campo. Actas del 1er Simposio del pino piñonero 1:203-209

Estaun V, Savé R, Biel C (1997) AM Inoculation as a biological tool to improve plant revegetation of disturbed soil with *Rosmarinus officinalis* L under semi-arid conditions. Applied Soil Ecology 6:223-229

Feret PP, Kreh RE (1986) Effect of undercutting on loblolly pine seedlings size and its relation to root growth potential. Southern Journal Application Forest 10:24-27

Fonseca D (1999) Manipulación de las características morfo-estructurales de plantones de especies forestales mediterráneas producidas en vivero. Trabajo de investigación. CIHEAM-IAMZ, Zaragoza, España

García O, Alcántar G, Cabrera RI, Gavi FR, Volke HV (2001) Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta. Terra 19:249-258

Jiménez R, Caballero M (1990) El Cultivo Industrial de Plantas en Maceta. Ediciones de Horticultura. Reus, España

Joffre R, Gillon D, Dardenne P, Agneessens R, Biston R (1992) The use of near-infrared reflectance spectroscopy in litter decomposition studies. Annales Science Forestière 49:481-488

Kozlowski TT, Pallardy SG (1997) Growth control in woody plants. Academic Press. San Diego. 641p.

Latt CR, Nair PKR, Kang BT (2001) Reserve carbohydrate levels in the boles and structural roots of five multipurpose tree species in a seasonally dry tropical climate. *Forest Ecology and Management* 146:145-158

Lemaire F (1989) Influence des caractéristiques physiques du substrat sur les systèmes racinaires de plantes ornementales cultivées en conteneurs ou en pots. *Agronomie* 9:795-801

Lloret F, Casanovas C, Peñuelas J (1999) Seedling survival of Mediterranean shrubland species in relation to root:shoot ratio, seed size and water and nitrogen use. *Functional Ecology* 13:210-216

Loescher WH, McCamant T, Keller JD (1990) Carbohydrate reserves, translocation, and storage in woody plant roots. *HortScience* 25:274-281

Marshall JD (1985) Carbohydrate status as an index of seedling quality. En Duryea, M. (Ed.): Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of mayor test. Forest Research Lab. Oregon State University Corvallis

Mattsson A (1991) Root growth capacity and field performance of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. *Scand. Journal Forest Research* 6:105-112

McLellan TM, Aber JD, Martin ME, Melillo JM, Nadelhoffer KJ (1991) Determination of nitrogen, lignin, and cellulose content of decomposing leaf material by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal Forest Research* 21:1684-1688

Pastor JN, Burés S, Savé R, Marfà O, Pages JM (1999) Transplant adaptation in landscape ornamental shrubs in relation with substrate physical properties and container sizes. *Acta Horticulturae* 481:137-144

Pastor JN, Marfà O, Savé R (2002) Adaptación al transplante de *Viburnum tinus* L. cultivado en contenedor. Valoración de la eficiencia hídrica. Proc. I Jornadas Ibéricas de Plantas Ornamentales. Sevilla, 313-323

Pastor JN, Marfà O, Savé R (2003) Influencia del sustrato y del tamaño del contenedor en el transplante al terreno definitivo de plantas ornamentales cultivadas en contenedor. *Actas de Horticultura* 39:527-528

Peñuelas JL, Cardeso MJ (1993) Los sustratos en la producción de planta forestal. *Montes* 32

Puttonen P (1997) Looking for the "silver-bullet" – can one test do it? *New Forest* 13:9-27

Rice WR (1988) Analyzing tables of statistical tests. *Evolution* 43: 223–225

Ritchie GA, Dunlap JR (1980) Root growth potential: its development and expression in forest tree seedlings. *Journal of Forestry Science* 10:218-248

Ritchie GA, Roden JR, Kleyn N (1985) Physiological quality of lodgepole pine and interior spruce seedlings: effects of lift date and duration of freezer storage. *Canadian Journal Forest Research* 15:636-645

Rodríguez-Trejo DA, Duryea ML (2003) Indicadores de calidad de planta en *Pinus palustris* Mill. *Agrociencia* 37:299-307

Royo A, Gil L, Pardos JA (2001) Effect of water stress conditioning on morphology, physiology and field performance of *Pinus halepensis* Mill. seedlings. *New Forests* 21:127-140

Salifu KF, Timmer VR (2001) Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply. *Soil Science Society of America* 65: 905-913

Savé R, De Herralde F, Retana J, Espelta JM, Biel C (1998) Effect of elevated CO₂ on plant productivity and hardening under Mediterranean conditions. Proc. The Earth's changing land GCTE-LUCC Open Science Conference on Global Change. Barcelona. Spain

Savé R, Biel C, De Herralde F, Retana J, Espelta JM (2002) Optimización de la producción viverística y de la restauración ecológica de zonas degradadas. *Riegos y Drenajes* 123:54-57

Schaberg PG, Snyder MC, Shane JB, Donnelly JR (2000) Seasonal patterns of carbohydrate reserves in red spruce seedlings. *Tree Physiology* 20:549-555

Seva JP, Vilagrosa A, Valdecantos A, Cortina J, Vallejo VR, Bellot J. (1996) Mycorrhization et application de compost urbain pour l'amélioration de la survie et de la croissance des semis de *Quercus ilex* ssp. *ballota* en milieu sec. To Options Méditerranéennes Ref Type: Internet Communication

Simpson DA, Ritchie GA (1997) Does RGP predict field performance? A debate. *New Forest* 13:253-277

Simpson DG, Thompson CF, Sutherland CD (1994) Field performance potential of interior spruce seedlings: effect of stress treatments and prediction by root growth potential and needle conductance. *Canadian Journal Forest Research* 24:576-586

Simpson DG, Vyse A (1995) Planting stock performance: Site and RGP effects. *Forestry Chronicle* 71:739-742

Smith JAC, Griffiths H (1993) Water deficits. Plant responses from cell to community. Bios Scientific Publishers. Oxford, 221-235

South D, Mitchell RJ (1999) Determining the "optimum" slash pine seedling size for use with four levels of vegetation management on a flatwood site in Georgia. U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research* 29:1039-1046

StatView (1999) by SAS Institute Inc

Tinus RW (1996) Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree Physiology* 16:795-799

Valdecantos A, Vilagrosa A, Seva JP, Cortina J, Vallejo VR, Bellot J (1996) Mycorrhization et application de compost urbain pour l'amélioration de la survie et de la croissance des semis de *Pinus halepensis* en milieu semi-aride. To Options Méditerranéennes. Ref Type: Internet Communication

Valdecantos V (2001) Aplicación de fertilizantes orgánicos en la repoblación de zonas forestales degradadas de la Comunidad Valenciana. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante

Van Den Driessche R (1992) Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen and potassium treatments. *Canadian Journal Forest Research* 22:740-748

Van Genuchten MT (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America* 44:892-898

Vartanian N (1975) Diversité morphologique du système racinaire en relation avec l'humidité édaphique. *Séminaires du Groupe d'Etude des Racines* 2:166-179

Villar-Salvador P, Planelles R, Oliet J, Peñuelas Rubira JL, Jacobs DF, González M (2004) Drought tolerance and transplanting performance of holm oak (*Quercus ilex*) seedlings after drought hardening in the nursery. *Tree Physiology* 24:1147-1155

Capítulo 2

Evaluación del incremento en la temperatura y CO_2 atmosféricos en vivero en el patrón de crecimiento de 4 especies forestales mediterráneas.

Introducción

La calidad de la planta es uno de los componentes más importantes de los que depende el éxito de la restauración de una cubierta vegetal (Villar-Salvador et al. 2004). Dicha calidad debe optimizar la capacidad de las plantas para superar tanto el estrés derivado de la plantación en campo (South y Mitchell 1999) como su resistencia a potenciales condiciones adversas de la zona donde se realiza la repoblación (ej. estrés hídrico estival en climas Mediterráneos, Vilagrosa et al. 2003). Esta resistencia va a depender, en general, de que las plántulas presenten una serie de características morfológicas y un estado fisiológico concreto en el momento de la plantación, y que dicho estado perdure durante la fase de establecimiento (Mattson 1997). Estas características morfológicas y fisiológicas pueden ser en gran medida determinadas por las condiciones de cultivo en vivero (Van Den Driessche 1992, Pastor et al. 1999). Entre los diferentes tratamientos aplicados a nivel experimental para mejorar simultáneamente la producción en vivero (número de plántulas, rapidez en el desarrollo) y la calidad de las plantas destacan el uso de cambios de temperatura y la utilización de atmósferas enriquecidas en CO₂. (véase para tratamientos de temperatura Landis et al. 1992, Wood 1995 y para CO₂ Callaway et al. 1994, Saxe et al. 1998, Savé et al. 1998, Gavazzi et al. 2000, Calamassi et al. 2001).

El control de la temperatura es una de las técnicas utilizadas en la producción viverística, puesto que su modificación puede modificar el desarrollo tanto de las raíces como de la parte aérea. Con respecto a la parte aérea, un aumento en la temperatura estimula procesos metabólicos, tales como la fotosíntesis y la respiración, y biofísicos, como la transpiración (Nobel et al. 1992). En cuanto a la parte subterránea, diferentes estudios han mostrado que la exposición de plántulas en el invernadero a modificaciones en la temperatura del aire influye en el crecimiento y el desarrollo posterior de las raíces, aunque esta respuesta varía de forma notable de unas especies a otras (Landis et al. 1992, Peñuelas y Ocaña 2000). Así, mientras que temperaturas entre 17-25 °C promueven un alargamiento rápido de la parte aérea y el desarrollo de la raíz con respecto a temperaturas inferiores y superiores durante las primeras semanas de crecimiento en *Picea glauca* (Wood 1995), se ha descrito una disminución en la longitud de las raíces y el número de raíces laterales comparando plántulas de *Pinus radiata* creciendo a 15 °C con plántulas a 27 °C durante 3 semanas (Bowen 1970).

Conjuntamente con el control de la temperatura, en los últimos años la aplicación de atmósferas enriquecidas en CO₂ ha sido una técnica de vivero usada para aumentar la producción viverística, acelerando el crecimiento de las plántulas y consiguiendo ejemplares de un mayor tamaño, y

mejor calidad (Savé et al. 1998). Una atmósfera elevada en CO₂ puede incrementar la productividad del vivero reduciendo el tiempo requerido para el crecimiento de las plantas, como también puede favorecer el conseguir plantas con una asignación preferencial de biomasa a las raíces, aumentando el cociente root/shoot (Curtis y Wang 1998, Norby et al. 1999, Tingey et al. 2000). Existen numerosos ejemplos sobre los beneficios del empleo de atmósferas enriquecidas en CO₂ para favorecer el desarrollo de las plantas, gracias a la estimulación de la fotosíntesis en este tipo de tratamientos (Heath y Kerstiens 1997, Eamus y Jarvis 1989). No obstante, se mantienen ciertas discrepancias sobre la incidencia de este estímulo en el modelo de asignación de biomasa entre órganos. Así, De Luis et al. (1999), han demostrado que el aumento de CO₂ estimula el crecimiento de tallos y hojas en detrimento de las raíces, mientras que otros autores describen como el abonado carbónico aumenta la asignación de biomasa a las raíces (Tingey et al. 2000, Cortés et al. 2004).

Hasta el momento se dispone de escasa información sobre cual puede ser la consecuencia de la combinación entre un aumento de la temperatura y de la concentración atmosférica de CO₂ para el desarrollo en vivero de plantas de especies arbóreas mediterráneas, especialmente respecto a su incidencia sobre los diferentes mecanismos de respuesta a la sequía, como la relación parte aérea parte subterránea, la acumulación de azúcares, y el ajuste rápido y de manera reversible de los flujos de agua. En este contexto, en el presente trabajo se plantean dos objetivos. El primer objetivo del estudio es evaluar el efecto de la temperatura y el enriquecimiento atmosférico en CO₂ durante la fase de vivero en el crecimiento, modelo de asignación de biomasa y potencial de producción de nuevas raíces (Root Growth Potencial: RGP) de plántulas de cuatro especies arbóreas Mediterráneas (*Q. ilex*, *Q. humilis*, *P. nigra*, *P. pinaster*). Estas especies fueron seleccionadas tanto por su importancia como material vegetal en reforestaciones en la cuenca mediterránea, como por la posibilidad de comparar el comportamiento de especies con diferente arquitectura, morfología foliar y modelo de asignación de biomasa entre órganos (coníferas vs. fagáceas) y distintos hábitos foliares (caducifolio en *Q. humilis* vs. perennifolio en *Q. ilex*). Por otra parte, ya que las concentraciones de nutrientes minerales y azúcares de reserva son atributos fisiológicos que pueden relacionarse con el potencial desarrollo posterior de las plantas en campo (Salifu y Timmer 2001), el segundo objetivo es evaluar el contenido de nitrógeno, la discriminación isotópica foliar del carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) y el porcentaje de almidón y azúcares a nivel de hojas y raíces después de recibir los diferentes tratamientos de temperatura y CO₂ en vivero.

Material y métodos

Diseño experimental

Las plántulas de *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Quercus ilex* y *Quercus humilis* utilizadas en este estudio fueron plántulas de una sabia cultivadas en contenedores de 250 cm³ con turba en el vivero comercial La Fageda (Olot-Girona). En diciembre de 2001, 2400 plántulas (600 de cada especie) fueron trasladadas a los invernaderos de la empresa Agromillora Catalana (Subirats) (Esquema 1-A) con la intención de aplicarles diferentes tratamientos de abonado carbónico atmosférico y de temperatura en vivero. En el momento de iniciarse el experimento las plántulas tenían respectivamente una altura y diámetro medio de 10.9 ± 0.4 cm y 2.7 ± 0.1 mm en *P. pinaster*, 12.9 ± 0.8 cm y 3.1 ± 0.1 mm en *P. nigra*, 16.7 ± 0.9 cm y 4.5 ± 0.3 mm en *Q. ilex*, y 18.8 ± 1.3 cm y 3.4 ± 0.2 mm en *Q. humilis*.

Los diferentes tratamientos experimentales aplicados, de diciembre de 2001 a marzo de 2002, consistieron en:

Temperatura (T): 200 plantas de cada especie se situaron en un invernadero en el que recibieron un aumento de la temperatura ambiental mediante aérotermos que inyectaban aire caliente en el invernadero, conservando a lo largo de todo el experimento una temperatura mínima de 12-13 °C.

Temperatura + CO₂ (T+CO₂): 200 plantas de cada especie fueron situadas en un invernadero en el que recibieron un aumento de la temperatura como en el tratamiento descrito anteriormente y un abonado carbónico atmosférico de 550-700 ppm de CO₂ industrial (Carbueros Metálicos, SA) (). Este abonado se realizó mediante aspersores con una válvula de 2 vías que se utilizaban tanto para regar como para inyectar el gas en el invernadero. La administración de CO₂ se realizaba de las 4 de la tarde a 10 de la mañana del día siguiente.

Control (C): 200 plantas de cada especie fueron situadas en un invernadero en condiciones estándar.

En los tres invernaderos la ventilación era pasiva y cenital. En la tabla 1 se muestran los valores de temperatura y humedad relativa en los tres tratamientos aplicados (T, T+CO₂, C) durante los meses del experimento.

Tabla 1. Valores medios \pm ES de temperatura (T) y humedad relativa (H.R.) media, mínima (mín.) y máxima (máx.) en los tres tratamientos de vivero control (C), temperatura (T) y temperatura mas abonado carbónico (T+CO₂).

Meses	T. media (°)		T. mín. (°)		T. máx. (°)		H.R. media (%)		H.R. mín. (%)		H.R. máx. (%)	
	T, T+CO ₂	C	T, T+CO ₂	C	T, T+CO ₂	C	T, T+CO ₂	C	T, T+CO ₂	C	T, T+CO ₂	C
Diciembre 2001	10.2 \pm 0.1	3.9 \pm 0.9	3.3	-5.5	23.6	17.3	63.3 \pm 0.3	76.7 \pm 2.3	29	22	100	97
Enero 2002	12.9 \pm 0.1	6.4 \pm 0.8	6.2	-0.2	29.1	21.3	69.1 \pm 0.3	80.2 \pm 2.4	26	30	96	100
Febrero 2002	13.7 \pm 0.1	7.6 \pm 1.0	9.8	0.4	34.0	22.6	66.5 \pm 0.4	57.2 \pm 2.8	22	19	100	95
Marzo 2002	14.1 \pm 0.2	10.1 \pm 2.1	9.8	1.6	29.9	16.0	79.9 \pm 0.7	73.2 \pm 7.5	32	27	96	93

Todas las plántulas de los diferentes tratamientos ensayados recibieron un riego por aspersión hasta punto de goteo del sustrato, asegurando una tasa de drenaje del 20%. En todos los casos se añadió al regar una solución nutritiva N-P-K (NO_3 5 meq/l, P_2O_4 1 meq/l, K 4 meq/l, Ca 6 meq/l, Mg 2.5 meq/l, SO_4 3 meq/l, Fe 1 mg/l, Mn 0.7 mg/l, Zn 0.3 mg/l, Cu 0.06 mg/l, Bo 0.6 mg/l, Mo 0.05 mg/l).

A finales de marzo del 2002 se eligieron 15 plantas de cada tratamiento y de cada especie al azar. De estas plantas se midió el diámetro del cuello de la raíz, la altura y se contó el número de hojas en las especies de *Q. ilex* y *Q. humilis*, para posteriormente separar la biomasa de los diferentes órganos: raíces, tallo, hojas anteriores a la aplicación de los tratamientos (H1) y, hojas aparecidas durante la aplicación de los tratamientos experimentales (H2), tan solo en el tratamiento T+CO₂ en el que se desarrollaron. En el caso de *Q. ilex* y *Q. humilis* y en las dos fracciones de hojas, se determinó el área foliar mediante un LI-COR Model 3100 (LI-COR, USA) así como el grosor mediante un micrómetro de 0.01 mm de precisión (Modelo 3000, Baxlo, USA). El peso seco de las diferentes fracciones se determinó mediante su secado a 70 ° C hasta la obtención de un peso seco constante. A partir de estas diferentes variables se calcularon diferentes índices de morfología y asignación de biomasa: root/shoot (R/S: biomasa de raíces/biomasa aérea), peso específico foliar (SLW: peso foliar/área foliar), leaf area ratio (LAR: area foliar/biomasa total). Asimismo se calculó el crecimiento absoluto en altura y el crecimiento relativo en altura (RGR: $\ln(\text{altura final/altura inicial})$).

Con el objetivo de analizar el contenido de nitrógeno en las raíces y en las diferentes fracciones de hojas (H1, H2), se mezclaron los órganos de tres plantas para cada tratamiento y especie, realizándose cuatro replicas diferentes. Después de molerlas, las muestras se enviaron a Servicios Xerais de Apoio a Investigación (Universidad de Santiago de Compostela) para determinar el contenido de nitrógeno en los diferentes órganos de las plántulas y el $\Delta^{13}\text{C}$. El contenido de carbono, nitrógeno y el análisis isotópico de las muestras se realizó con un analizador elemental Carlo Erba Instruments EA1108 CHNSO conectado a un espectrómetro de masa de relación isotópica DELTA^{plus} de Finnigan MAT. Las unidades de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) se refieren a la proporción de los isótopos estables $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ presentes en el tejido con respecto a un estándar (PDB, Pee Dee Belemnite). Las relaciones isotópicas para el carbono se han expresado como $\delta^{13}\text{C}$ en relación a una escala estándar de referencia VPDB (Vienna Peedee Belemnite Standard) según (Farquhar et al., 1989). En la escala de PDB, el CO₂ atmosférico suele tener un valor de composición isotópica del carbono del aire δ_a de aproximadamente - 12 ‰ (en nuestro experimento, plántulas del tratamiento C y T), mientras que en el caso de las plántulas sometidas

a tratamiento de CO₂, el δ¹³C del aire del invernadero era de -20 ‰, de acuerdo con la metodología desarrollada por Nogués et al. (2004).

A partir de la discriminación isotópica del carbono determinada sobre la materia seca,

$$\Delta (\Delta(\text{‰})) = (\delta_a - \delta_p) / (1 + \delta_p),$$

se puede calcular una eficiencia en el uso del agua (WUE_Δ) (Farquhar y Richards, 1984). La WUE_Δ estimada fue calculada a partir de la Δ que esta relacionada con el cociente entre la presión parcial para el carbono intercelular y la atmósfera (p_i/p_a):

$$(\Delta(\text{‰})) = a + (b-a) \cdot (p_i/p_a).$$

(a y b son las discriminaciones del ¹³C debidas al aire (4.4‰) y a la carboxilación principalmente por el enzima RuBP carboxilasa (27.0‰) respectivamente. Así WUE puede definirse como una función de p_i/p_a:

$$WUE_{\Delta} (\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}) = p_a \cdot (1 - p_i/p_a) / V \cdot (1 - \text{HR}) \cdot 1.6$$

donde V es la presión parcial de vapor de agua a saturación para una temperatura y humedad relativa (HR) determinadas (Farquhar et al. 1982). Para el cálculo de V se utilizaron las medias de las humedades relativas máximas diarias durante toda la fase de vivero.

En una sub-muestra de la mezcla de las hojas (H1+H2), tallos y raíces de tres plantas para cada tratamiento y especie, se determinó la concentración de almidón y azúcares solubles mediante espectroscopia de reflectancia de infrarrojo cercano (NIRSystems 6500, Foss NIRSystems, Raamsdonksveer, The Netherlands) según el método descrito por Joffre et al. (1992). Los valores medidos fueron obtenidos con errores estándar de calibración de 1.50% para los azúcares solubles y 2.20% para el almidón. A partir de la suma de la concentración de azúcares solubles y almidón se calculó la concentración de carbohidratos totales no estructurales (% TNC).

Con el objetivo de valorar el potencial de crecimiento de las raíces con posterioridad a recibir los tratamientos experimentales aplicados en el vivero, se escogieron al final del experimento diez plantas por especie y tratamiento (en total 120 plantas), las cuales se trasplantaron a contenedores de 3 litros de capacidad y 17 cm de diámetro con un sustrato de perlita tipo A13 (Europerlita S.A) para estudiar con detalle el crecimiento de las nuevas raíces mediante la técnica del RGP (root growth potencial, ver Ritchie y Dunlap 1980, Villar-Salvador et al. 1999). Esta técnica consiste en hacer crecer las plántulas en un sustrato de perlita durante un cierto tiempo, para después desenterrarlas y medir la capacidad de producción de nuevas raíces (s.e. fracción de raíces que invaden el sustrato de perlita desde el cepellón original). Este seguimiento se realizó en las instalaciones del IRTA (Cabrils) de principios de marzo a finales de abril 2002. Durante el ensayo las plantas recibían diariamente un riego de aspersion equivalente a 3.7 mm por planta y una vez a la semana se mezclaba el agua con una solución nutritiva (1:0,11:1,25(N: P2O5:K2O,

pH= 6,5)). Al cabo de 30 y 45 días después de iniciar el ensayo, se realizó la medida del crecimiento potencial de las raíces en cinco plantas por especie y tratamiento. Esta medida se realizó arrancando la raíz con mucho cuidado para evitar romperla y contando y separando todas las raíces nuevas mayores de 1 cm que sobresalían del cepellón original y ocupaban el nuevo sustrato de perlita. De estas nuevas raíces se midió su longitud total con un aparato Digital Image Analysis System (Delta Device, Cambridge, England), antes de secarlas a 70 °C para obtener el peso seco. Por lo que respecta a las raíces iniciales, contenidas en el cepellón con sustrato original, se lavaron cuidadosamente y después se determinó su peso seco (70° en estufa hasta obtener un peso constante). Estas medidas se complementaron con la determinación del peso seco de la part aérea (70 °C hasta obtener un peso constante).

Análisis estadísticos

El efecto de los factores ESPECIE (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) y TRATAMIENTO en vivero (C, T y T+CO₂) sobre el crecimiento, morfología, asignación de biomasa entre órganos, concentración de nitrógeno, azúcares solubles, almidón, carbohidratos no estructurales totales (TNC), $\delta^{13}\text{C}$ y eficiencia en el uso del agua (WUE) de las plántulas se analizó mediante ANOVAs de dos factores. Para este análisis la variable porcentaje de nitrógeno y TNC fueron transformadas en arco seno de la raíz cuadrada. El efecto de los factores ESPECIE, TRATAMIENTO en vivero y TIEMPO (30, 45 días) sobre el número, peso seco, y la longitud total de nuevas raíces se analizó mediante un ANOVA de tres factores. En estos análisis, se utilizó el residuo de las regresiones de estas variables respecto a la biomasa total, en lugar de los valores originales, con el fin de sustraer posibles efectos del tamaño del individuo en estas variables (s.e. en las tres variables, valores positivos indicaban valores superiores a los esperados según la biomasa total, mientras que valores negativos indicaban valores menores a los esperados). Todos los análisis estadísticos realizados en este estudio se efectuaron con el programa estadístico StatView (SAS Institute Inc. 1999).



Esquema 1: Plántulas en las instalaciones de los viveros de AGROMILLORA (A), plántulas de *pinus* y *Quercus* después de recibir los tratamientos de T+CO₂ (B).

RESULTADOS

Los diferentes tratamientos aplicados (C, T y T+CO₂) modificaron significativamente el crecimiento de las plántulas así como su morfología y patrón de asignación de biomasa (Tabla 2), si bien existieron importantes diferencias entre las cuatro especies estudiadas, tal y como indica la significación de la mayoría de interacciones especie x tratamiento. En líneas generales, tanto la aplicación de temperatura como su combinación con abonado carbónico estimularon el crecimiento en altura de las plántulas, aunque este incremento fue muy superior en el tratamiento T+CO₂ (Figura 1). Entre las cuatro especies estudiadas, únicamente las plantas de *P. pinaster*, mostraron cierto crecimiento en altura en el tratamiento de control. Por lo que respecta a la asignación de biomasa entre órganos (raíces, tallo y hojas), la temperatura y sobretodo T+CO₂ disminuyeron la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea (root/shoot) en *Q. ilex* y *Q. humilis*, mientras que las dos especies de pino (*P. pinaster* y *P. nigra*) mostraron un root/shoot similar en todos los tratamientos aplicados (Figura 2A). La disminución en el root/shoot en las dos especies de *Quercus* en T y T+CO₂ se debió a un importante aumento de la biomasa de tallos (Figura 2B) y de hojas (solo en T+CO₂) (Figura 2C), no compensado por un aumento de la biomasa radicular, que incluso llegó a disminuir en *Q. humilis* en T y T+CO₂ (Figura 2D). Un análisis más detallado del efecto de los tratamientos en las características foliares (sólo realizado en *Q. ilex* y *Q. humilis*) mostró que las plántulas mantenían un área foliar similar en los tratamientos control y de temperatura, pero que en cambio el área foliar se incrementaba en T+CO₂, especialmente en *Q. humilis* (Figura 3A). Este hecho se debió en gran parte a que esta especie mostró una gran producción de hojas nuevas en este tratamiento de abonado carbónico (Figura 3B).

La aplicación de los tratamientos de T y T+CO₂ no tan solo modificó el crecimiento y la morfología de las plantas sino que afectó también al contenido en nitrógeno, la discriminación isotópica foliar del carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) y la eficiencia en el uso del agua (WUE) (Tabla 3). Las especies estudiadas mostraron un contenido diferente de N en las raíces (mayor en los pinos, datos no mostrados) que se incrementó en todos los casos al recibir el tratamiento de T y de T+CO₂ (C= 0.107% **b**, T= 0.111% **ab**, T+CO₂= 0.113% **a**). En el caso del contenido en N foliar, existieron también diferencias entre especies (mayor contenido en *Q. humilis* y *P. nigra*, datos no mostrados), si bien este parámetro no se vio afectado por la temperatura o el abonado carbónico (Tabla 2). Por lo que respecta a $\Delta^{13}\text{C}$, *P. pinaster* fue la especie que presentó valores más negativos, tanto en las hojas originales como en las que aparecieron en el tratamiento T+CO₂ (*P. pinaster* = $-31.9 \pm 0.16\text{‰}$ **a**, *P. nigra* = $-28.4 \pm 0.09\text{‰}$ **b**, *Q. ilex* = $-29.9 \pm 0.33\text{‰}$ **c**, *Q. humilis* = $-27.5 \pm 0.19\text{‰}$ **d**). En las cuatro especies, el $\Delta^{13}\text{C}$ disminuyó en el tratamiento T+CO₂, con respecto a las plantas control y a las que recibieron el tratamiento de temperatura (C= -28.02‰ **a**, T= -28.24‰ **a**, T+CO₂= -28.88‰ **b**).

Tabla 2. Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) y del tratamiento (C, T y T+CO₂) sobre diversas variables morfológicas y de asignación de biomasa: biomasa total, altura, crecimiento relativo en altura (RGR altura), crecimiento absoluto en altura (C. absoluto altura), biomasa de raíces, biomasa del tallo, biomasa de las hojas, root/shoot (R/S), leaf area ratio (LAR), número de ramificaciones, peso específico de las hojas nuevas (SLW N) y número de hojas nuevas en *Q. ilex* y *Q. humilis*. Significación estadística: *, p<0.05; **, p<0.01; ***, p<0.001.

Fuente de variación	Biomasa Total	Altura	RGR Altura	C. absoluto Altura	Biomasa raíces	Biomasa tallo	Biomasa hojas	R/S	LAR	Nº ramificaciones	SLW N	Nº Hojas nuevas
Especie (S)	66.0 ^{***}	31.7 ^{***}	101.5 ^{***}	72.0 ^{***}	146.8 ^{***}	60.3 ^{***}	10.6 ^{***}	149.8 ^{***}	50.2 ^{***}	20.0 ^{***}	8.9 [*]	5.1 [*]
Tratamiento (T)	3.7 [*]	78.6 ^{***}	220.6 ^{***}	333.5 ^{***}	0.2	34.0 ^{***}	4.8 ^{**}	29.7 ^{***}	110.3 ^{***}	0.2	79.5 ^{***}	48.3 ^{***}
S x T	2.6 [*]	5.6 ^{***}	11.0 ^{***}	8.3 ^{***}	3.4 ^{**}	4.0 ^{**}	2.7 [*]	9.0 ^{***}	36.0 ^{***}	2.3 [*]	0.4	6.5 ^{**}

Tabla 3. Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), tratamiento (C, T, y T+CO₂) (en el caso de las hojas nuevas solo el tratamiento de T+CO₂) sobre el % Nitrógeno (% N) en raíces y hojas y el $\Delta^{13}\text{C}$ en las hojas. Significación estadística: *, p<0.05; **, p<0.01; ***, p<0.001.

Fuente de variación	Raíces		Hojas anteriores		Hojas nuevas	
	% N	$\Delta^{13}\text{C}$	% N	$\Delta^{13}\text{C}$	% N	
Especie (S)	141.6 ^{***}	63.8 ^{***}	57.1 ^{***}	80.7 ^{***}	26.8 ^{***}	
Tratamiento (T)	4.8 [*]	13.9 ^{***}	2.9	---	---	
S x T	1.9	2.2	0.6	---	---	

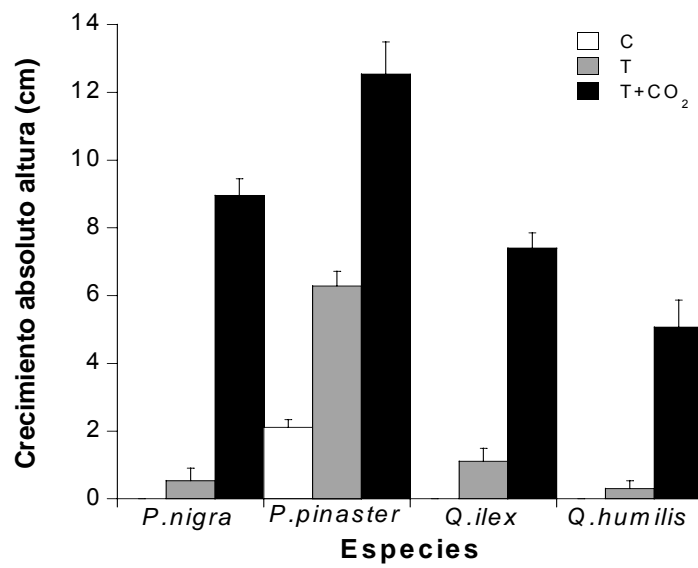


Figura 1. Media + ES del crecimiento absoluto en altura en plantas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* en los tratamientos de control (C), temperatura (T), y temperatura con abonado carbónico (T+CO₂).

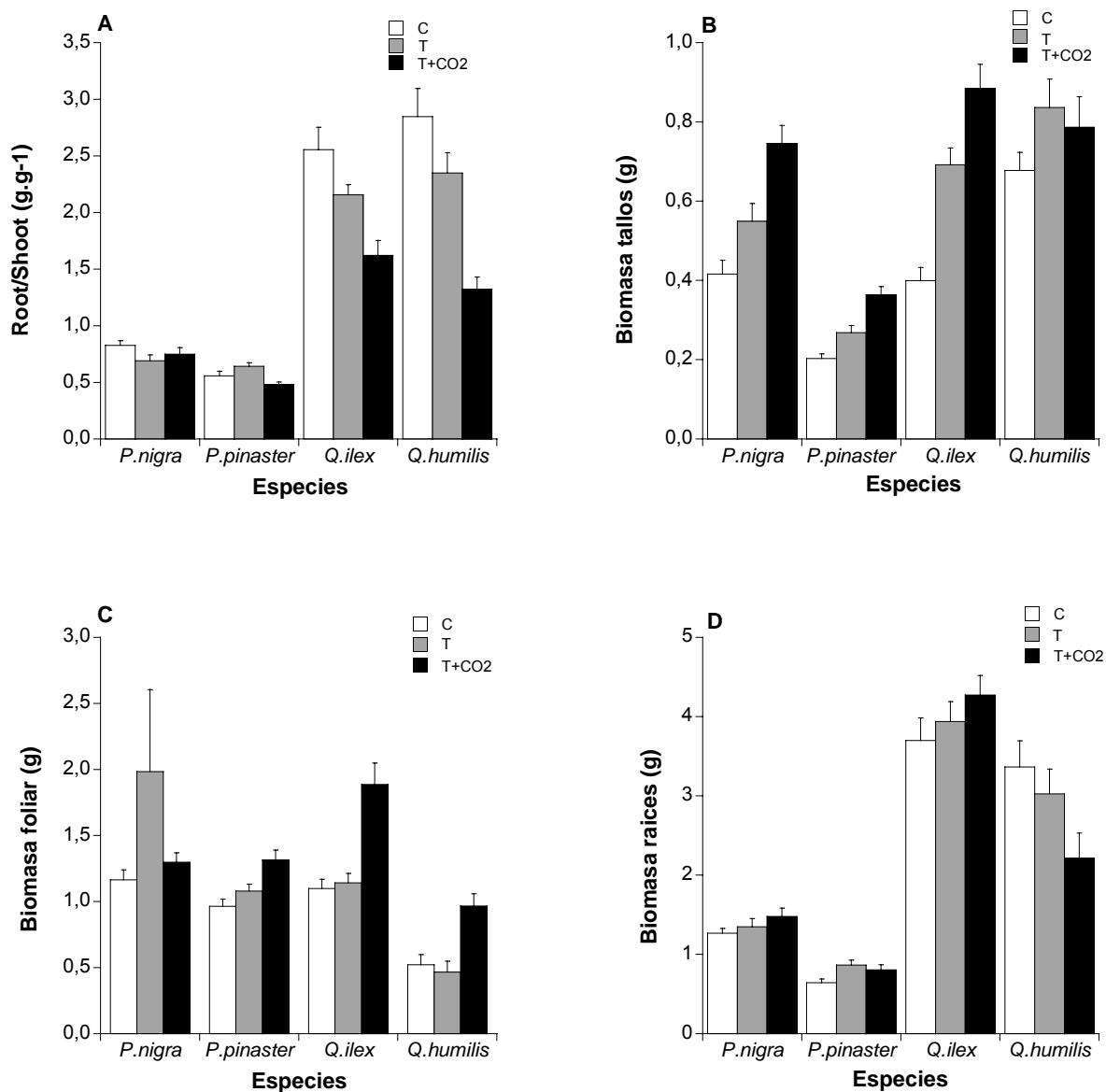


Figura 2. Media + ES del root/shoot (A), biomasa de tallos (B), biomasa foliar (C), y biomasa de raíces (D) en plántulas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* sometidas a los tratamientos de control (C), temperatura (T), y temperatura con abonado carbónico (T+CO₂).

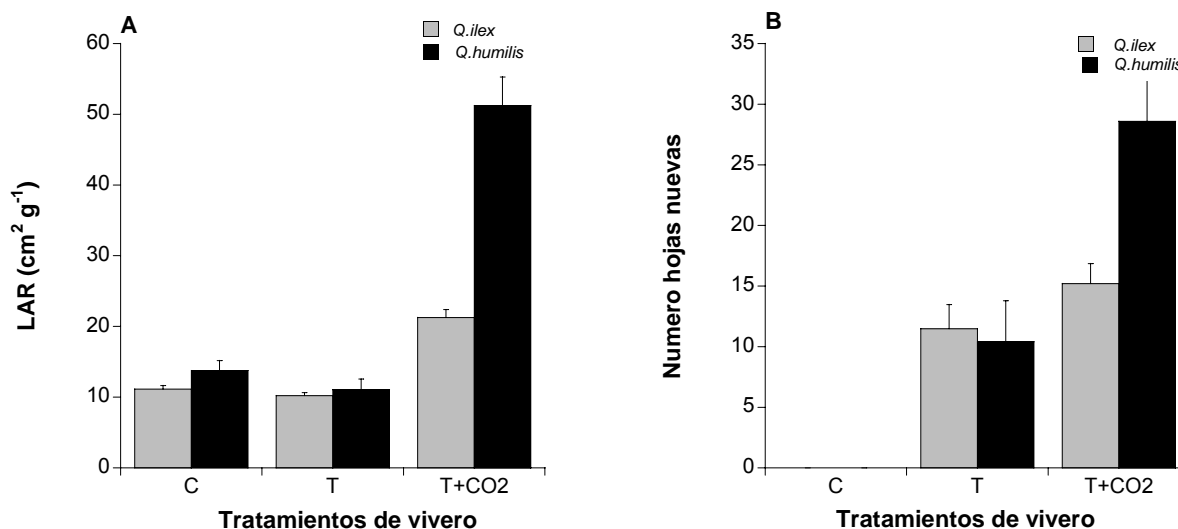


Figura 3. Media + ES del LAR (A) y del número de hojas nuevas (B) en plántulas de *Q. ilex* y *Q. humilis* sometidas a los tratamientos de control (C), temperatura (T), y temperatura con abonado carbónico (T+CO₂).

Entre las cuatro especies estudiadas se observaron diferencias significativas (ANOVA, $F = 71.7$, $p < 0.001$) en la eficiencia en el uso del agua (WUE), siendo esta mayor en *P. nigra* y *Q. humilis* en comparación con *P. pinaster* y *Q. ilex* ($P_n = 11.2 \pm 0.5$ a, $P_p = 9.1 \pm 0.5$ b, $Q_h = 11.5 \pm 0.6$ a, $Q_i = 10.6 \pm 0.5$ c $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$). En todos los casos, las plántulas del tratamiento T+CO₂ mostraron una mayor WUE (ANOVA, $F = 592.7$, $p < 0.001$) en comparación con las plántulas de los tratamientos C y T (T+CO₂ = $12,4 \pm 0,2$ a, T = $10,2 \pm 0,3$ b, C = $7,5 \pm 0,2$ c $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$).

Respecto a la concentración de carbohidratos no estructurales (TNC), los diferentes tratamientos aplicados modificaron significativamente su contenido, aunque existieron importantes diferencias entre las cuatro especies estudiadas y los tres diferentes órganos de la planta analizados (raíz, tallo y hojas) (Tabla 4). La interacción tratamiento x especie (Figura 4) muestra que mientras en los dos *Quercus*, el porcentaje de TNC disminuía en el tratamiento T+CO₂ en comparación con C y T, tanto en *P. nigra* como en *P. pinaster* el porcentaje de TNC se mantenía muy similar en los tres tratamientos de vivero.

De los diferentes órganos de la planta (raíz, tallo y hojas), las raíces fueron las que presentaron la concentración significativamente más alta de TNC en las dos especies de *Quercus* (*Q. ilex* y *Q. humilis*) en comparación con las hojas y el tallo, mientras que las dos especies de pino (*P. pinaster* y *P. nigra*), mantenían un porcentaje de TNC igual en los 3 órganos de la planta (Figura 5). La mayor presencia de TNC en las raíces de *Q. ilex* y *Q. humilis* obedece seguramente a la gran cantidad de almidón encontrada en las raíces de ambos *Quercus* en comparación con las hojas y tallos (Figura 6).

Tabla 4. Valores F del test ANOVA de los efectos de las especies (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), tratamiento (T, T+CO₂, C) y los órganos de la planta (Raíz, tallo y hojas) sobre las variables calculadas de arcoseno del almidón, azúcares y TNC. Significación estadística: *, p<0.05; **, p<0.01;***, p<0.001.

Fuente de variación	Almidón	Azúcares	TNC
Especie (S)	51.7***	234.7***	116.1***
Tratamiento (T)	25.8***	23.9***	48.8***
Órganos (O)	880.1***	522.7***	146.6***
S x T	8.4***	0.5	6.9***
T x O	9.6***	5.8***	4.6***
S x O	66.3***	14.4***	66.9***
S x T x O	4.3***	1.9*	4.5***

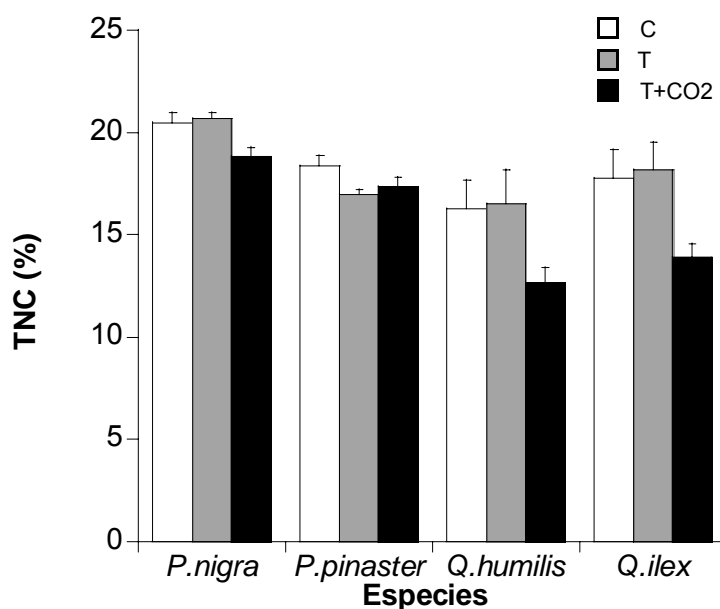


Figura 4. Media + ES de TNC en plantas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* en los tratamientos de control (C), temperatura (T), y temperatura con abonado carbónico (T+CO₂).

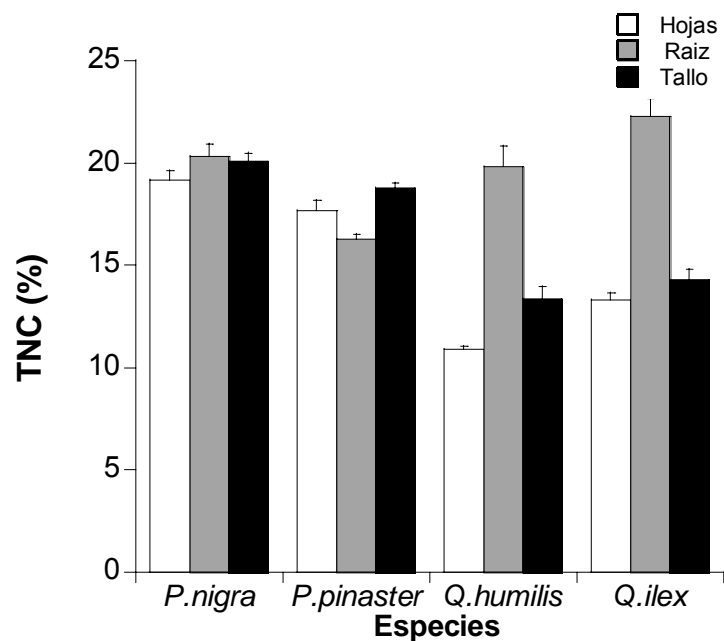


Figura 5. Media + ES de TNC en plantas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* en los 3 órganos de la planta (Raíces, tallo y hojas).

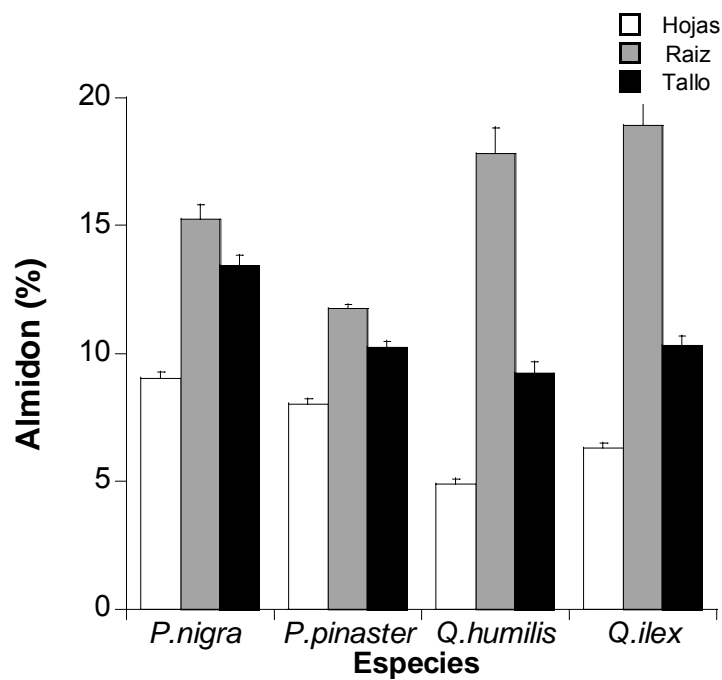


Figura 6. Media + ES de almidón en plantas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis* en los 3 órganos de la planta (Raíces, tallo y hojas).

El análisis del potencial de crecimiento de las raíces de las plántulas (RGP: Root Growth Potential) con posterioridad a recibir los tratamientos experimentales, indicó que al cabo de un mes casi todas las plantas produjeron nuevas raíces de un tamaño entre 1 cm y 5 cm. En todas las especies y tratamientos, el número, longitud y biomasa de las nuevas raíces dependió significativa y positivamente de la biomasa total (regresión lineal, $r = 0.58$ para el número, $r = 0,67$ para la longitud y $r = 0, 56$ para el peso de nuevas raíces). No obstante, el análisis del efecto de los factores especie, tratamiento en vivero y período de muestreo en estas variables, una vez descontado el efecto de la biomasa total, puso de manifiesto diferencias significativas entre especies y períodos de muestreo en el número, longitud y el peso de las nuevas raíces así como una interacción entre el tratamiento y el periodo de muestreo en el número y longitud (Tabla 8). Tal y como se muestra en la Figura 7, *P. nigra* y *P. pinaster* produjeron mayor número, longitud y biomasa de nuevas raíces que *Q. ilex* y *Q. humilis*. En todas las especies, esta producción fue mayor en el segundo período de muestreo que en el primero (datos no mostrados). Por lo que respecta a la interacción entre el tratamiento y el momento de muestreo, ésta indicó un aumento en el número y longitud de las nuevas raíces en el tratamiento de T y T+CO₂ en el segundo período de muestreo (Tabla 8, Figura 8).

Tabla 7. Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), tratamiento (C, T, y T+CO₂) y período de muestreo (30 y 45 días) sobre la biomasa de raíces nuevas, el número de raíces nuevas y la longitud de las raíces nuevas. En todas estas variables se ha utilizado el residuo de la respectiva regresión con la biomasa total de la planta Significación estadística:*, p<0.05; **, p<0.01;***, p<0.001.

Fuente de variación	Biomasa raíces nuevas	Nº raíces nuevas	Longitud raíces nuevas
Especie (S)	8.7***	4.8**	4.7**
Tratamiento (T)	2.2	1.5	1.1
Periodo (P)	14.8***	12.0***	19.2***
T x S	1.5	1.8	1.0
T x P	2.6	4.2*	6.5**
S x P	0.4	1.1	1.3

Tabla 8. Valores de las medidas del número y longitud de las nuevas raíces en el tratamiento de T y T+CO₂ en los dos periodos de muestreo.

Tratamientos de vivero	Nº nuevas raíces		Longitud nuevas raíces (cm)	
	T1	T2	T1	T2
C	36.7 ± 7.8	36.3 ± 4.3	96.7 ± 20.6	93.3 ± 16.2
T	26.7 ± 4.0	54.1 ± 6.5	46.7 ± 7.7	138.5 ± 17.4
T+CO ₂	40.0 ± 5.3	75.3 ± 11.3	76.1 ± 13.6	189.3 ± 27.1

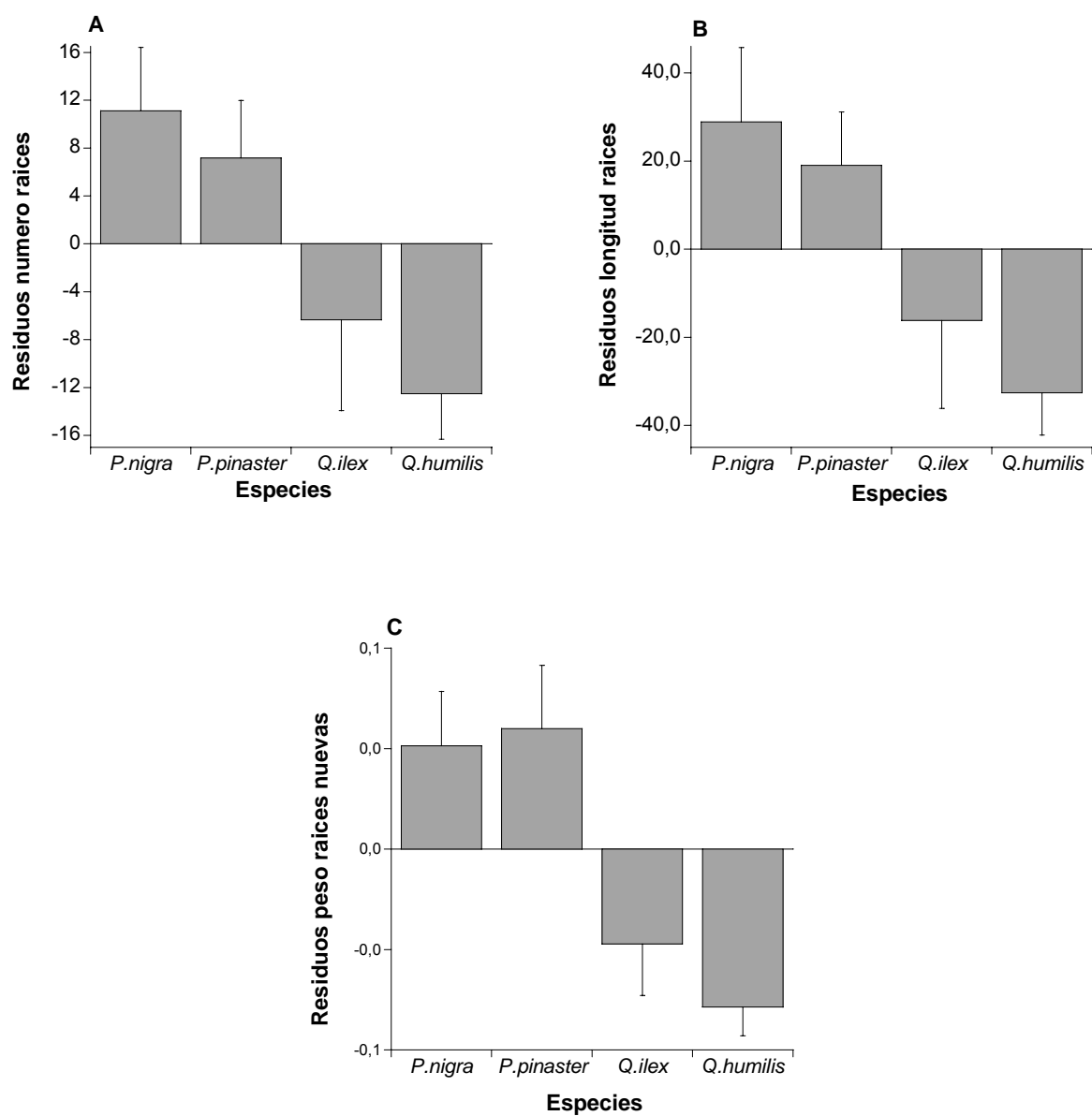


Figura 7. Media \pm ES del número de raíces nuevas (A), longitud de raíces nuevas (B) y peso de raíces nuevas (C) en las plántulas de *P. nigra*, *P. pinaster*, *Q. ilex* y *Q. humilis*.

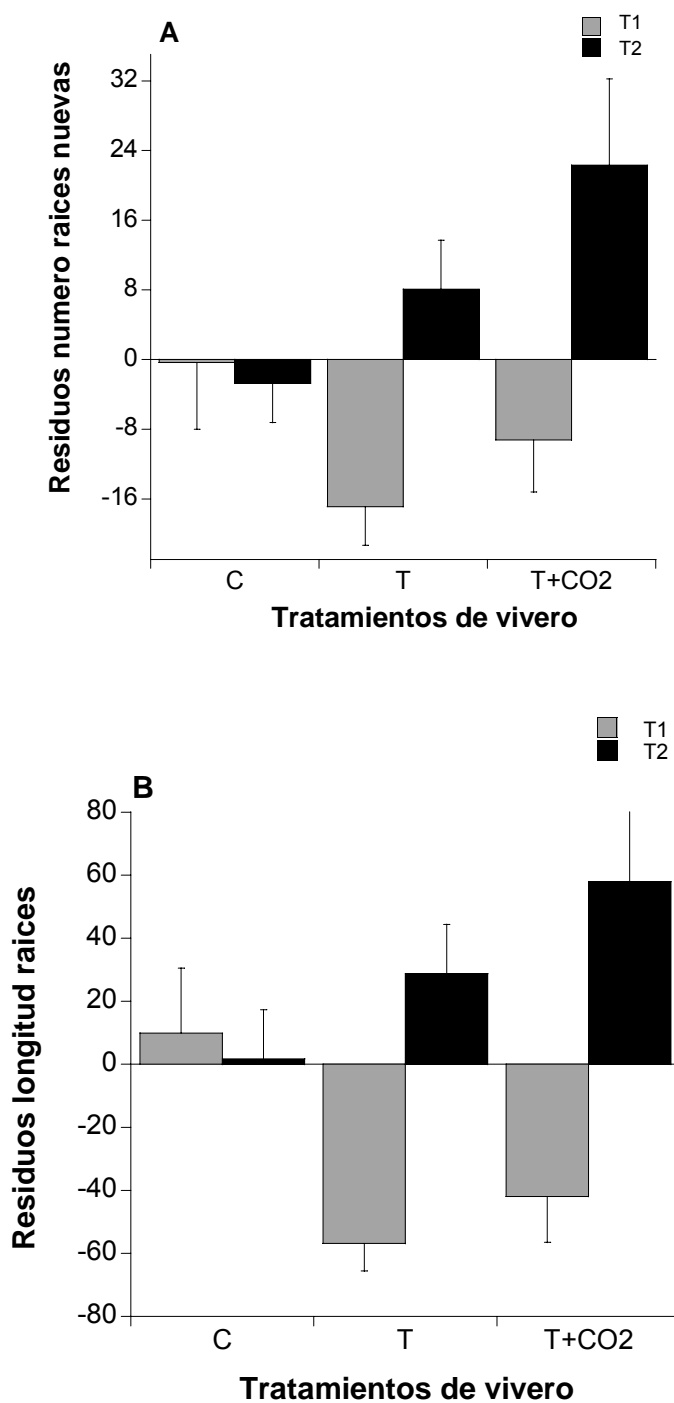


Figura 8. Media + ES del número de raíces nuevas (A) y longitud de raíces nuevas (B), en las plántulas previamente sometidas a los tratamientos de control (C), temperatura (T), y temperatura con abonado carbónico (T+CO₂) al cabo de 30 días (T1) y 45 días (T2) después de iniciado el experimento de crecimiento potencial de las raíces.

DISCUSIÓN

En las cuatro especies estudiadas tanto la aplicación de un incremento de la temperatura mínima como su combinación con abonado carbónico durante una corta fase de vivero estimularon el crecimiento (altura) de las plántulas, siendo este incremento muy superior en el tratamiento T+CO₂ con un rango de valores entre el doble en *P. pinaster* y entre cinco y diez veces mayor aproximadamente en *Q. ilex*, *Q. humilis* y *P. nigra*. El efecto del incremento de la temperatura sobre el desarrollo de las plantas ha sido objeto de múltiples estudios, los cuales han atribuido este efecto a diferentes cambios fisiológicos y morfológicos como: una mayor movilización de carbohidratos (Andersen et al. 1986), disminución del estrés hídrico (Grossnickle y Blake 1985), aumento de las tasas de fotosíntesis y mayor crecimiento foliar (Hällgren y Öquist 1990). En el caso de las plantas del tratamiento T+CO₂, además del efecto beneficioso del aumento de la temperatura estas se beneficiaron del abonado carbónico. La estimulación del crecimiento en atmósferas enriquecidas en CO₂ se ha atribuido a una mejora en las tasas de fotosíntesis y de la eficiencia en el uso del agua (véase entre otros, Long 1991), así como al incremento en el área y biomasa foliar (Ward y Strain 1999). Pese a esta respuesta general de estímulo del crecimiento en altura de las plántulas, se observaron grandes diferencias entre las cuatro especies, con un mayor efecto en *P. pinaster* y *P. nigra* en comparación con *Q. ilex* y *Q. humilis*, probablemente debido a que ambos *Quercus* son de crecimiento más lento (Ocaña et al. 2004) y mantienen una mayor asignación de biomasa al sistema radicular (Canadell y Rodá 1991)

La aplicación de los tratamiento de T y T+CO₂ no solo modificó el crecimiento sino también la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea, destacando la disminución de la relación root/shoot en *Q. ilex* y *Q. humilis*, mientras que en *P. pinaster* y *P. nigra* se mantenía similar en los tres tratamientos (Figura 2). Los posibles cambios en la asignación de biomasa entre la parte subterránea y aérea ha sido uno de los aspectos más estudiados y controvertidos en ensayos con atmósferas enriquecidas en CO₂. Estos estudios han aportado resultados tanto a favor de la disminución de esta relación (Tschaplinski et al. 1995), como de su mantenimiento (Tissue et al. 1997, Curtis y Wang 1998, Poorter y Nagel 2000) o bien del aumento, debido a que en condiciones de elevado CO₂, otros recursos, como agua o nutrientes podrían pasar a ejercer un efecto limitante del crecimiento y estimularían el desarrollo radicular (Norby 1994, Wullschleger et al. 2002). La disminución en el root/shoot en las plántulas de *Quercus*, pero no en los pinos, observada en nuestro experimento podría atribuirse a que *Q. ilex* y *Q. humilis* presentaban ya al principio un sistema radicular más desarrollado, que les permitiría captar el agua y los nutrientes necesarios para su desarrollo, y por tanto pudieran bajo las condiciones favorables de T+CO₂, invertir más en crecimiento aéreo (véase, Tschaplinski et al. 1995). En este sentido cabe destacar que, en ambas especies, la relación entre superficie foliar y biomasa aumentó de manera

significativa en el tratamiento de T+CO₂ (Figura 3), especialmente en *Q. humilis* donde la producción de hojas fue más importante. A pesar de esta diferencia, no existió un mayor crecimiento del roble con respecto a la encina, aunque diferentes autores han apuntado una mayor respuesta al CO₂ en las especies caducifolias en comparación con las perennifolias debido al menor peso específico foliar de las primeras (véase, Poorter et al. 1996, Cornelissen et al. 1999).

Por lo que respecta al contenido de nutrientes en los diferentes órganos, en todas las especies estudiadas el porcentaje de N en las raíces de las plántulas crecidas en T+CO₂ fue mucho mayor que en los otros tratamientos (C y T), debido posiblemente a que en el primer caso se trataba de plantas más activas, con mayor biomasa foliar y mayores tasas de fotosíntesis, lo que posibilitaba destinar más reservas a las raíces (Vogel et al. 1997, Martínez et al. 2002). Esta mayor cantidad de N almacenado en las raíces puede tener importantes consecuencias para el futuro desarrollo de la planta puesto que la asimilación fotosintética del C por las hojas depende mucho de la fuente de nitrógeno en las raíces finas (Cannell y Dewar 1994).

La composición isotópica de carbono $\Delta^{13}\text{C}$ en las plantas es un índice integrador que permite inferir la actividad fisiológica en términos de estrés hídrico e intercambio de CO₂, puesto que los cambios en $\Delta^{13}\text{C}$ están relacionados con la actividad fotosintética y estomática (Farquhar et al. 1982, Farquhar y Richards 1984). En nuestro experimento, las plántulas del tratamiento T+CO₂ son las que presentan una eficiencia en el uso del agua (WUE) más alta y producen más biomasa, en comparación con las plántulas de los tratamientos C y T que tienen una WUE más baja, lo cual las hace más resistentes pero poco productivas.

El principal cambio observado en nuestro experimento en la composición química del material vegetal en crecimiento bajo CO₂ elevado es la disminución en los carbohidratos totales no estructurales (TNC). La relación entre los tratamientos de vivero y la concentración de almidón y de los azúcares en las raíces puede ser explicada considerando que la cantidad de almidón y azúcares representa un equilibrio entre el índice de fotosíntesis, la respiración y el crecimiento (Tinus et al. 2000). Entre los dos géneros, cabe destacar que las concentraciones de almidón fueron más altas en los *Quercus* que los pinos, que seguramente es debido a la mayor proporción de biomasa de raíces en las primeras especies (Curtis y Wang 1998). En nuestro caso, durante el periodo de vivero, el tratamiento T no ha favorecido el consumo de las reservas de TNC, en cambio, su combinación con el abonado carbónico favoreció el consumo de las reservas de TNC que fueron necesarias para el mantenimiento y el crecimiento de los individuos (especialmente las reservas en las raíces).

Los tres tratamientos que las plantas recibieron en el vivero condicionaron su posterior capacidad de producción de nuevas raíces (RGP), siendo esta mayor en las del tratamiento de T y sobretodo T+CO₂, tanto en biomasa como en longitud. Este resultado puede explicarse por el hecho que tanto el crecimiento como la esperanza de vida de las raíces dependen en buena medida de la cantidad de carbohidratos y nutrientes (ej. N) almacenados en ellas, generalmente mayores a niveles elevados de CO₂, tal y como se ha encontrado en el presente estudio y en otros trabajos (Tingey et al. 1997, Kubiske y Godbold 2001). Si bien esta prueba de la capacidad de producción de nuevas raíces es considerada como un indicador para detectar el vigor de la planta y en muchos estudios se ha visto correlacionada con su posterior funcionamiento en condiciones de campo (Tinus 1996, Simpson y Ritchie 1997), cabe preguntarse hasta que punto las diferencias observadas en los tratamientos experimentales a nivel de vivero pueden traducirse en diferencias de respuesta frente a una limitación de la disponibilidad hídrica, una de las principales restricciones en restauraciones en climas Mediterráneos (ver capítulo 4).

La demanda de material vegetal para restauraciones tiende a mostrar importantes variaciones entre años, con la necesidad a menudo de producir gran cantidad de plántulas en poco tiempo (Clewel y Rieger 1997), a la vez que los programas de restauración tienden a exigir una mayor calidad del material vegetal a utilizar. En este contexto, los resultados de nuestros experimentos permiten establecer algunas recomendaciones respecto a la utilización de atmósferas enriquecidas en CO₂ durante la producción en vivero de *Pinus* sp. y *Quercus* sp. Mediterráneos. En líneas generales, con un aumento en la T todas las especies incrementaron su crecimiento, a la vez que combinando este tratamiento con un incremento en CO₂ aumentaba también el contenido en N en las raíces, la concentración de carbohidratos y la capacidad posterior de las plantas de producir nuevas raíces (RGC). No obstante cabe destacar el diferente impacto de este tratamiento en el modelo de asignación de las plantas, manteniéndose el root/shoot tanto en *P. nigra* como en *P. pinaster* y disminuyendo en *Q. ilex* y *Q. humilis*. Así, en ambas especies de pinos la aplicación de CO₂ aparece como una prometedora herramienta para aumentar la productividad viverística con el fin de lograr un mayor número de plantas en un menor tiempo, consiguiendo a la vez un material vegetal de mayor porte y con un modelo de asignación de biomasa similar a las plantas que no reciben este tratamiento (control). Por el contrario en el caso de los *Quercus*, deberían desarrollarse nuevas investigaciones que valoraran las posibilidades de combinar una atmósfera enriquecida en CO₂ para estimular su crecimiento en vivero (ver también Cortes et al. 2004), con otros tratamientos que favoreciesen el mantenimiento o incluso aumento de la relación entre biomasa subterránea y aérea (ver capítulo 1).

Bibliografía

- Andersen CP, Sucoff EI, Dixon RK (1986) Effects of root zone temperature on root initiation and elongation in red pine seedlings. *Canadian Journal Forest Research* 16:696-700
- Bowen GD (1970) Effects of soil temperature on root growth and on phosphate uptake along *Pinus radiata* roots. *Australian Journal Soil Restoration* 8:31-42
- Calamassi R, Della Rocca G, Falusi M, Paoletti E, Strati S (2001) Resistance to water stress in seedlings of eight European provenances of *Pinus halepensis* Mill. *Annals Forest Science* 58:663-672
- Callaway RM, DeLucia EH, Thomas EM, Schlesinger WH (1994) Compensatory responses of CO₂ exchange and biomass allocation and their effects on the relative growth rate of ponderosa pine in different CO₂ and temperature regimes. *Oecologia* 98:159-166
- Canadell J, Rodá F (1991) Root biomass of *Quercus ilex* in a montane Mediterranean forest. *Canadian Journal Forest Research* 21:1771-1778
- Cannell MGR, Dewar RC (1994) Carbon allocation in trees: a review of concepts for modelling. *Advances in Ecological Research* 25:59-104
- Clewell A, Rieger JP (1997) What restorationists need from restoration ecologists. *Restoration Ecology* 5:350-354
- Cornelissen JHC, Carnelli AL, Callaghan TV (1999) Generalities in the growth, allocation and leaf quality responses to elevated CO₂ in eight woody species. *New Phytologist* 141:401-409
- Cortes P, Espelta JM, Savé R, Biel C (2004) Effects of nursery CO₂ enriched atmosphere in the germination and seedling morphology of two Mediterranean oaks with contrasting leaf habit. *New Forests* 28:79-88
- Curtis PS, Wang X (1998) A meta analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology. *Oecologia* 113:299-313
- De Luis I, Irigoyen JJ, Sánchez-Díaz M (1999) Elevated CO₂ enhances plant growth in droughted N₂-fixing alfalfa without improving water status. *Physiologia Plantarum* 87:84-89
- Eamus D, Jarvis PG (1989) The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. *Advances in Ecological Research* 19:1-55

Farquhar GD, O'Leary MH, Berry JA (1982) On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* 9:121-137

Farquhar GD, Richards RA (1984) Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Australian Journal of Plant Physiology* 11:539-552

Farquhar GD, Hubick KT, Condon AG y Richards RA (1989) Carbon isotope fractionation and water-use efficiency. En: Rundel PW, Ehleringer JR y Nagy KA (eds), *Stable Isotopes in ecological research*. *Ecological Studies* 68: 21-40 Springer-Verlag. New York

Gavazzi M, Seiler J, Aust W, Zedaker S (2000) The influence of elevated carbon dioxide and water availability on herbaceous weed development and growth of transplanted loblolly pine (*Pinus taeda*). *Environmental and Experimental Botany* 44:185-194

Grossnickle SC, Blake TJ (1985) Acclimation of cold-stored jack pine and white spruce seedlings: Effect of soil temperature on water relation patterns. *Canadian Journal Forest Research* 15:544-550

Hällgren JE, Öquist G (1990) Adaptations to low Temperatures. In: Eds. Alscher RG and Cumming JR *Stress Responses in Plants: Adaptation and Acclimation Mechanisms*, Wiley-Liss Inc. New York. 265-293

Heath J, Kerstiens G (1997) Effects of elevated CO₂ on leaf gas exchange in beech and oak at two levels of nutrients supply: consequences for sensitivity to drought in beech. *Plant, Cell and Environment* 20:57-67

Joffre R, Gillon D, Dardenne P, Agneessens R, Biston R (1992) The use of near-infrared reflectance spectroscopy in litter decomposition studies. *Annales Science Forestière* 49:481-488

Kubiske ME, Godbold DL (2001) Influence of CO₂ on the growth and function of roots and root systems. Department of forestry, Mississippi State

Landis TD, Tinus RW, McDonalds SE, Barnett JP (1992) Atmospheric environment, Vol. 3, *The Container Tree Nursery Manual*. *Agricultura Handbook*. 674. Washington, DC: US Department of Agriculture, Forest Sertvice.145p.

Long SP (1991) the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentration: Has its importance been underestimated? *Plant, Cell and Environment* 14:729-739

Martínez F, Lazo YO, Fernández-Galiano JM, Merino J (2002) Root respiration and associated costs in deciduous and evergreen species of *Quercus*. *Plant, Cell and Environment* 25:1271-1278

Mattsson A (1997) Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forest* 13:227-252

Nobel PS, Alm DM, Cavelleir J (1992) Growth respiration, maintenance respiration and structural-carbon costs for roots of three desert succulents. *Functional Ecology* 6:79-85

Nogués S, Tcherkez G, Cornic G, Ghashghaie J (2004) Respiratory Carbon Metabolism following illumination in Intact French Bean Leaves Bean Leaves Using $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Isotope Labeling. *Plant Physiology* 136:3245-3254

Norby RJ (1994) Issues and perspectives for investigating root responses to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant and Soil* 165:9-20

Norby RJ, Wullschlegel SD, Gunderson CA, Johnson DW, Ceulemans R (1999) Tree responses to rising CO_2 in field experiments: implications for the future forest. *Plant, Cell and Environment* 22:683-714

Ocaña-Bueno L, Lario-Leza FJ, Gómez Fernández JA, Rodríguez Gallego R (2004) La mejora de la estabilidad en las repoblaciones con *Pinus pinaster* Ainton en el Norte de España. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 17:211-215

Pastor JN, Burés S, Savé R, Marfà O, Pages JM (1999) Transplant adaptation in landscape ornamental shrubs in relation with substrate physical properties and container sizes. *Acta Horticulturae* 481:137-144

Peñuelas Rubira JL, Ocaña BL (2000) Cultivo de plantas forestales en contenedor. Ediciones Mundi-prensa, Madrid, España. 109-118

Poorter H, Roumet C, Campbell BD (1996) Interspecific variation in the growth response of plants to elevated CO_2 : a search for functional types. In. "Carbon dioxide, populations, and communities" Körner C and Bazzaz F (Eds), Academic Press: 375-411

Poorter H, Nagel O (2000) The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO_2 , Nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal Plant Physiology* 27:595-607

Ritchie GA, Dunlap JR (1980) Root growth potential: its development and expression in forest tree seedlings. *Journal of Forestry Science* 10:218-248

Salifu KF, Timmer VR (2001) Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply. *Soil Science Society of America* 65:905-913

Savé R, De Herralde F, Retana J, Espelta JM, Biel C (1998) Effect of elevated CO₂ on plant productivity and hardening under Mediterranean conditions. Proc. The Earth's changing land GCTE-LUCC Open Science Conference on Global Change. Barcelona. Spain

Saxe H, Ellsworth DS, Heath J (1998) Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytologist* 139:395-436

Simpson DA, Ritchie GA (1997) Does RGP predict field performance? A debate. *New Forest* 13:253-277

South D, Mitchell RJ (1999) Determining the "optimum" slash pine seedling size for use with four levels of vegetation management on a flatwoods site in Georgia. U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research* 29:1039-1046

StatView (1999) by SAS Institute Inc

Tingey DT, Phillips DL, Johnson MG, Storm MJ, Ball JT (1997) Effects of elevated CO₂ and N fertilization on fine root dynamics and fungal growth in seedling *Pinus ponderosa*. *Environment and Experimental Botany* 37:73-83

Tingey DT, Phillips DL, Johnson MG (2000) Elevated CO₂ and conifer roots: effects on growth, life span and turnover. *New Phytologist* 147:87-103

Tinus RW (1996) Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree Physiology* 16:795-799

Tinus RW, Burr KE, Atzmon N, Riov J (2000) Relationship between carbohydrate concentration and root growth potential in coniferous seedlings from three climates during cold hardening and dehardening. *Tree Physiology* 20:1097-1104

Tissue DT, Thomas RB, Strain BR (1997) Atmospheric CO₂ enrichment increases growth and photosynthesis of *Pinus taeda*: a 4 year experiment in the field. *Plant, Cell and Environment* 20:1123-1134

Tschaplinski TJ, Stewart DB, Hanson PJ, Norby RJ (1995) Interactions between drought and elevated CO₂ on growth and gas exchange of seedlings of three deciduous tree species. *New Phytologist* 129:63-71

Van Den Driessche R (1992) Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen and potassium treatments. *Canadian Journal Forest Research* 22:740-748

Vilagrosa A, Cortina J, Gil Pelegrín E, Bellot J (2003) Suitability of drought-preconditioning techniques in Mediterranean climate. *Restoration Ecology* 11:208-216

Villar-Salvador P, Ocaña L, Peñuelas J, Carrasco I (1999) Effect of water stress conditioning on the water relations, root growth capacity, and the nitrogen and non-structural carbohydrate concentration of *Pinus halepensis* Mill. (Aleppo pine) seedlings. *Annals Forest Science* 56:459-465

Villar-Salvador P, Planelles R, Oliet J, Peñuelas Rubira JL, Jacobs DF, González M (2004) Drought tolerance and transplanting performance of holm oak (*Quercus ilex*) seedlings after drought hardening in the nursery. *Tree Physiology* 24:1147-1155

Vogel CS, Curtis PS, Thomas RB (1997) Growth and nitrogen accretion of dinitrogen-fixing *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Under elevated carbon dioxide. *Plant Ecology* 130:63-70

Ward JK, Strain BR (1999) Elevated CO₂ Studies: Past, present and future. *Tree Physiology* 19:211-220

Wood B (1995) Conifer Seedling Grower Guide. Alberta Environmental Protection, Smoky Lake, Alberta, Canada. 78p.

Wullschleger SD, Tschaplinski TJ, Norby RJ (2002) Plant water relations at elevated CO₂ - implications for water-limited environments. *Plant, Cell and Environment* 25:319-331

Capítulo 3

Efecto de la aplicación de fango térmico durante el establecimiento en campo de plántulas de *Quercus ilex*, *Quercus humilis* y *Pinus nigra* endurecidas previamente en vivero.

Introducción

Los suelos mediterráneos son propensos a sufrir diferentes procesos de degradación debido tanto a las características climáticas, como a la reiteración de perturbaciones (ej. incendios) y al uso intensivo al que han sido sometidos (Trabaud 1991, Piñol et al. 1998). En este contexto, estos suelos pueden requerir medidas dirigidas a mejorar sus condiciones físico-químicas y aumentar las reservas de nutrientes para asegurar la supervivencia y el crecimiento de la vegetación, tanto en condiciones naturales como de repoblación (Coppenet y Juste 1987, Vallejo et al. 2000). En los últimos años, una de las técnicas que han llamado más la atención para mejorar las características físico-químicas de suelos degradados ha sido la aplicación de residuos orgánicos como los fangos de depuradora (Robinson et al. 2002). Además, la cantidad de fangos de depuradora que se genera, por ejemplo en Europa, ha incrementado en los últimos años, representando su eliminación un grave problema que incita a la búsqueda de vías sostenibles y económicamente viables para su aprovechamiento (Tarrasón 2004). Así de los 6,5 millones de toneladas en materia seca generadas el año 1998, el 49,61% eran reutilizadas en suelos y un 47,6% eran eliminadas por incineración o en vertederos (European Commission 2002). Además de la gran disponibilidad y de su bajo coste, existen evidencias experimentales de que la utilización de fangos de depuradora puede, gracias a su elevado contenido en materia orgánica, mejorar las características físicas del sustrato (Robinson y Röper 2003, Seva et al. 1996, Kimberley et al. 2004), aumentando la porosidad y estabilidad de los agregados (Sort y Alcañiz 1999), reduciendo la tasa de erosión (Sort y Alcañiz 1996, Ojeda et al. 2003), y favoreciendo de esta manera la capacidad de retención de agua (Düring y Gäth 2002, Adesodun et al. 2005). Asimismo la aplicación de fango incrementa la fertilidad del suelo gracias a su contenido en nutrientes como N, P, K y micro nutrientes esenciales (Düring y Gäth 2002, Robinson et al. 2002, Valdecantos et al. 1996). Sin embargo, esta posible aplicación debe tener en cuenta la calidad de los fangos utilizados, dado el posible impacto ambiental negativo que estos también pueden llegar a tener debido a la lixiviación de nitrógeno, presencia de metales pesados (Smith y Tibbett 2004) e incluso patógenos (Valdecantos et al. 2004, Andrés y Domene 2005). Por este motivo, se requiere aumentar la investigación sobre las posibilidades y las limitaciones del uso de fangos de depuradora como herramienta para promover el establecimiento de una cubierta vegetal en suelos degradados, o en otras aplicaciones forestales como plantaciones de crecimiento rápido (Navas et al. 1999, Valdecantos 2001).

La mayoría de fangos de depuradora que se aplican al suelo proceden de tratamientos secundarios en las plantas depuradoras de aguas residuales, mediante digestión aeróbica o anaeróbica y deshidratación parcial (fango concentrado). Sin embargo, la tendencia actual consiste en mejorar la calidad o facilidad de aplicación de estos abonos mediante postratamientos

de compostaje o de secado térmico (Tarrasón 2004). Los efectos sobre el suelo de la aplicación de fango concentrado han sido ampliamente estudiados (ver entre otros: Sort y Alcañiz 1996, Ortiz 1998, Navas et al. 1999, Tarrasón 2004). Estos estudios han demostrado los efectos positivos de este tratamiento en cuanto a la mejora en las características físicas del suelo (ej. aireación, capacidad de retención de agua en Düring y Gäth 2002), incremento en la materia orgánica del suelo (hasta un 0,5% más respecto a abonos de tipo mineral en Tarrasón 2004) y en la biomasa microbiana del suelo (Petersen et al. 2003). Estas mejoras se traducen en un estímulo del desarrollo de la biomasa herbácea y crecimiento del estrato arbóreo (Navas et al. 1999, Tarrasón 2004), aumentando el recubrimiento del suelo y reduciendo de esta manera la erosión superficial (Sort y Alcañiz 1996). A diferencia de la abundante información sobre la aplicación de fango concentrado, los fangos en estado de compost o secados térmicamente son materiales relativamente nuevos, y sus efectos en aplicaciones de campo son todavía poco conocidos (Naoum 1998, Ojeda et al. 2003). En el caso del fango secado térmicamente (deshidratación a 120-140°C), que es uno de los menos estudiados en comparación con los otros, el post-tratamiento permite: conservar una gran parte del nitrógeno, destruir los patógenos, y sobretodo eliminar la mayor parte del contenido de agua reduciendo el volumen y permitiendo un importante ahorro en los costes de transporte (Valdecantos et al. 2004). Sin embargo, como inconvenientes principales se ha indicado el elevado gasto energético en su producción así como una posible mayor toxicidad de los contaminantes presentes que en los mismos lodos compostados o concentrados (Domene 2004). La posible existencia de estos efectos contradictorios indica la necesidad de aumentar la información sobre el impacto que puede tener la aplicación del fango térmico sobre la supervivencia y desarrollo de la vegetación (ej. repoblaciones forestales), así como de potenciales diferencias entre las especies mayoritariamente utilizadas en estos programas de reforestación.

La respuesta de las plántulas a las condiciones de plantación, en nuestro caso debidas a las posibles mejoras en la estructura y fertilidad del suelo por la aplicación de fango térmico, puede depender a su vez de las características morfológicas y fisiológicas adquiridas durante la fase de vivero. Sin embargo los resultados obtenidos sobre esta cuestión son contradictorios. Así, mientras algunos autores han señalado una capacidad de supervivencia en campo similar de plantas que han adquirido un diferente tamaño en la fase de vivero (Biel et al. 2004), otros estudios han indicado que las plantas procedentes de cultivos en vivero sin fertilizar que tenían un mayor desarrollo radical, mostraban una mayor capacidad de evitación de la sequía (Jacobs et al. 2004). Para seguir esta línea de mejora de las plántulas en la fase de vivero y asegurar una mejor repoblación, existen otros estudios que han mirado el interés de someter las plántulas a tratamientos de pre-acondicionamiento por estrés hídrico controlado para aumentar el endurecimiento del material vegetal. Este pre-acondicionamiento puede activar o acentuar los

mecanismos de resistencia de las plantas a situaciones de estrés, a partir de diferentes características morfológicas y fisiológicas como: una reducción en el tamaño de la planta, o un mayor desarrollo de la parte subterránea (Savé et al. 1995, Villar-Salvador et al. 1999). En este contexto, el objetivo de este trabajo ha sido evaluar la supervivencia, desarrollo y modelo de asignación de biomasa de plántulas de *Pinus nigra*, *Quercus ilex* y *Quercus humilis*, endurecidas previamente en vivero con diferentes niveles de estrés hídrico, bajo diferentes tipos de aplicaciones de fango térmico en campo.

Material y métodos

Cultivo de las plántulas en vivero

Se utilizaron plántulas de *P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis* de 1 sabia crecidas en contenedores de 250 cm² con turba, procedentes de los viveros comerciales de la Fageda (Olot-Girona). En Abril de 2001, estas plántulas fueron trasladadas a los viveros del IRTA (Instituto de Recerca Tecnològica y Agroalimentaria, Cabriels, Barcelona 2º 30`E, 41º45`N) con la intención de aplicarles diferentes tratamientos de riego durante unos 6 meses. 80 plantas de cada especie recibieron 100% de agua, equivalente a 1,07 litros de agua por planta (R100) y aproximadamente 66% de agua, equivalente a 0,71 litros de agua por planta (R66), durante los 6 meses. En diciembre de 2001, las plántulas fueron transplantadas a los campos experimentales del IRTA (Esquema 1-A y B) con la intención de aplicarles los tratamientos con fangos de depuradora. Ni la altura ni el diámetro resultaron significativamente afectados por los diferentes tratamientos de riego aplicados (Tabla 1).

Tabla 1 Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), y del riego (R100 y R66) sobre la altura y el diámetro. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	Altura	Diámetro
Especie (E)	18.6	5.5
Riego (R)	8.7	2.2
E X R	3.1	5.3

En el momento del transplante las plántulas tenían las medidas mostradas en la tabla 2.

Tabla 2 Media \pm ES de la altura, diámetro, biomasa total y root/shoot de las plántulas después de seis meses de aplicación de los dos tratamientos de riego (100% y 66% de agua).

Riego (%)	Altura (cm)		Diámetro (mm)		Biomasa total (g)		Root/shoot	
	R100	R66	R100	R66	R100	R66	R100	R66
<i>P. nigra</i>	24.4 \pm 1.2	23.05 \pm 1.2	6.12 \pm 0.4	4.7 \pm 0.3	10.1 \pm 1.2	6.5 \pm 0.9	0.7 \pm 0.2	0.6 \pm 0.1
<i>Q. ilex</i>	45.5 \pm 5.9	27.60 \pm 2.1	4.61 \pm 0.3	4.23 \pm 0.3	15.1 \pm 3.1	8.4 \pm 1.0	1.1 \pm 0.2	1.6 \pm 0.1
<i>Q. humilis</i>	47.4 \pm 4.3	41.7 \pm 3.3	4.41 \pm 0.3	5.05 \pm 0.3	8.8 \pm 1.3	7.9 \pm 1.1	0.9 \pm 0.1	0.9 \pm 0.1

Entre las diferentes especies estudiadas se mostró una diferencia significativa, con una mayor altura de las especies de *Quercus* (*Q. ilex* y *Q. humilis*) que la especie de pino (*P. nigra*) (Tabla 1).

Suelo experimental

El suelo presente en los campos experimentales del IRTA (Centro de Cabrils) corresponde a un *Regosol arénico eutrítico* (WRB, 1999) desarrollado sobre granodioritas, de textura franco-arenosa gruesa y pH neutro. La plantación se realizó en parcelas instaladas en bancales nivelados.

Lodos de depuradora

El fango térmico utilizado se obtuvo de un lote de fangos urbanos concentrados procedentes de la EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) de Blanes (Cataluña, España). El secado térmico se realizó en las instalaciones de la EDAR de Banyoles (Cataluña, España). Con unos veinte minutos de secado térmico, los fangos perdían la mayor parte de agua y se convirtieron en un producto de textura granular menor a 2 mm cuya composición se detalla en la Tabla 3. El contenido total en metales pesados es inferior al máximo permitido por la reglamentación europea en el caso de aplicaciones agrícolas.

Tabla 3 Principales características del fango secado térmicamente procedente de la EDAR de Blanes, abril 2000. Las características estudiadas se calcularon sobre materia seca (s.m.s).

Características	
Materia seca (g kg ⁻¹ , sobre muestra fresca)	846.9
Materia orgánica (calcinación) (g kg ⁻¹ (s.m.s))	674.6
Carbono oxidable (g kg ⁻¹ (s.m.s))	512.0
Nitrógeno total (g kg ⁻¹ (s.m.s))	44.5
Nitrógeno amoniacal (g kg ⁻¹ (s.m.s))	3.36
Fósforo total (g kg ⁻¹ (s.m.s))	24.5
pH	7.1
Conductividad eléctrica (1:5 agua) (dS m ⁻¹ a 25°C)	5.28
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.51

Diseño experimental

La cantidad de fango aplicada de 100g por plántula, equivale aproximadamente a 1500g/m³ y pretende acercarse a una dosis de abonado de fondo moderada equivalente a 100 kg de N total por ha (J.M. Alcañiz comunicación personal). En todos los casos se puso el fango térmico en los hoyos de plantación a una profundidad entre 20 y 25 cm (volumen equivalente a más o menos 0.016 m³).

Los diferentes tratamientos de fango térmico aplicados consistieron en:

1. Fango depositado en el fondo (FF): 100g de fango secado térmicamente se pusieron en el fondo del hoyo de plantación.
2. Fango mezclado con el suelo (FM): 100g de fango secado térmicamente se mezclaron con el volumen de suelo extraído del hoyo de plantación justo al momento de plantar.
3. Control (C): las plántulas se plantaron sin ningún aporte de fango de depuradora.

En este experimento, se distribuyeron al azar 162 plantas de cada tratamiento previo de riego (R66 y R100), de cada tratamiento de fango térmico (C, FM y FF) y de cada especie (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) en una parcela experimental que dividimos en tres bloques (Figura 1).

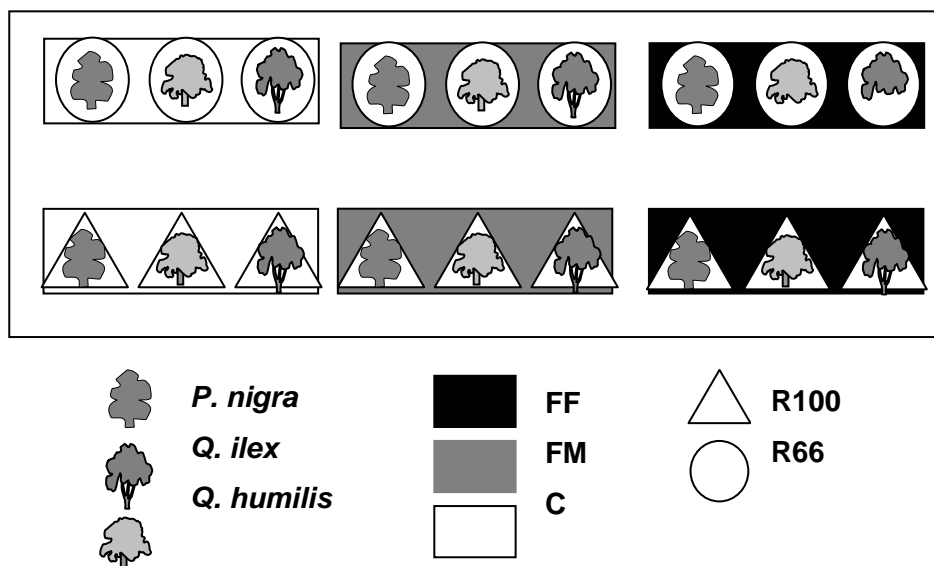


Figura 1 Esquema de la parcela experimental, representando la distribución de las especies (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) y los diferentes tratamientos aplicados: riego previo en vivero (R66 y R100) y aporte de fango térmico (C, FM y FF).

Análisis del suelo

Con el fin de analizar las principales características del suelo (materia orgánica, nutrientes, textura) antes y después de aplicarle el fango térmico, se tomaron muestras de suelo en tres épocas diferentes: al aplicar los lodos (diciembre 2001), 7 meses después (julio 2002) y a los 11 meses de la aplicación (octubre 2002). Para cada muestreo, se escogieron 2 réplicas de cada bloque y cada tratamiento de campo (C y FM). Estos análisis no se realizaron en el tratamiento de FF, pues en este el fango se depositaba por separado en el fondo del hoyo de plantación. El contenido de materia orgánica fue analizado mediante el método de oxidación por vía húmeda, el nitrógeno total fue determinado con el método Kjeldahl, la salinidad por conductimetría, el pH con el método del potenciómetro y la textura con el método de la pipeta de Robinson. En el caso de los análisis de salinidad y pH, dentro del mismo bloque se hizo una muestra compuesta de cada tratamiento de campo, ya que para este tipo de análisis no hacían falta tantas replicas para determinar diferencias entre los tratamientos. En la tabla 4 se muestran las características del suelo antes y después de aplicarle el fango térmico.

Tabla 4. Características del suelo (C y FM) un mes después de la aplicación del fango térmico.

Propiedad	Control (C)	Fango mezclado (FM)
Arena (%)	72,0 ± 1,83	69,4 ± 2,8
Limos (%)	15,4 ± 2.0	17,9 ± 2,4
Arcilla (%)	12,0 ± 0,5	12,7 ± 0,5
Textura	franco-arenoso	franco-arenoso
Nitrógeno (%)	0,066 ± 0.0	0,069 ± 0.0
Materia orgánica (%)	1,01 ± 0,07	1,03 ± 0,04
Carbono orgánico (%)	0,58 ± 0,04	0,59 ± 0,03
Salinidad (dS m ⁻¹)	0,18 ± 0,01	0,20 ± 0,01
pH	7,7 ± 0,1	7,6 ± 0,1

Variables medidas en las plántulas

Dos meses después de plantar se midieron la supervivencia, la altura, diámetro, número de ramificaciones y el número de hojas (en el caso de *Q. ilex* y *Q. humilis*). Estas medidas de supervivencia, altura y diámetro se repitieron en dos nuevos muestreos, uno en julio de 2002 y el otro en octubre de 2002. En cada uno de estos muestreos se arrancaron con mucho cuidado (Esquema 1-C), para evitar romper la arquitectura de las raíces, 3 plantas de cada especie (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*) de los tratamientos con riego previo en vivero (R66 y R100), abonado con fangos (C, FM y FF) y de cada bloque (B1, B2 y B3) para la determinación del peso seco de las hojas, tallo y raíz mediante su secado a 70° C hasta la obtención de un peso constante. En el caso de las raíces estas fueron lavadas cuidadosamente con agua. En el segundo muestreo (octubre 2002) se midió, además del peso seco de todos los órganos de la planta, la longitud total de las raíces mediante Digital Image Análisis System (Delta Device, Cambridge, England). En *Q. ilex* y *Q. humilis*, se midió también en ambos muestreos el contenido relativo de clorofila mediante un SPAD (Chlorophyll meter, Minolta Model 502) y el peso específico de las hojas cogiendo una muestra de la hoja mediante una perforadora de superficie conocida y midiendo su peso seco.

Análisis estadísticos

Las variaciones sobre las propiedades del suelo (pH, salinidad, materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno) del efecto de los factores BLOQUE (B1, B2 y B3), aportación de FANGO TÉRMICO (C, FM) y TIEMPO (diciembre, julio y octubre) fueron analizados mediante un ANOVA de tres factores. Todas las variables expresadas en porcentaje (materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno) fueron transformadas en arcoseno de la raíz cuadrada previamente a realizar el análisis.

El análisis de los datos de la supervivencia final de las plantas según los diferentes factores ESPECIE (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), RIEGO previo en vivero (R66 y R100), tipo de aportación de FANGO TÉRMICO (C, FF, FM) fue analizado mediante ANOVA de 3 factores. La variable porcentaje de supervivencia fue transformada en arcoseno de la raíz cuadrada.

El análisis de los datos del crecimiento relativo en altura (RGR: $\ln(\text{altura final}/\text{altura inicial})$), crecimiento relativo en diámetro (RGR: $\ln(\text{diámetro final}/\text{diámetro inicial})$) y crecimiento en biomasa ($\ln(\text{biomasa final}/\text{biomasa inicial})$) según los diferentes factores BLOQUE (B1, B2 y B3), ESPECIE (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), RIEGO previo en vivero (R66 y R100), tipo de aportación de FANGO TÉRMICO (C, FF, FM) se llevo a cabo mediante ANOVAs de 4 factores. En el caso del crecimiento relativo en biomasa, la biomasa inicial se estimó utilizando regresiones alométricas entre el volumen ($\text{diámetro}^2 \times \text{altura}$) y la biomasa de una submuestra de plántulas. El análisis de las variables root/shoot, biomasa total al final del experimento, RWR (biomasa raíz/biomasa total), SWR (biomasa tallo/biomasa total), LWR (biomasa hojas/biomasa total) y clorofila (solo en *Q. ilex* y *Q. humilis*) según los factores BLOQUE, ESPECIE, RIEGO previo en vivero, TRATAMIENTOS de campo y TIEMPO (julio y octubre) se llevo a cabo mediante un ANOVA de 5 factores. Finalmente, el efecto de los factores BLOQUE, ESPECIE, RIEGO previo en vivero, tipo de aportación de FANGO TÉRMICO sobre la longitud de las raíces se analizó mediante un ANOVA de 5 factores, en el que se introdujo la biomasa total de las plántulas como covariable. Las comparaciones a posteriori entre niveles de cada factor principal se realizó mediante el test de Fisher-LSD. Como en ninguno de los análisis el factor bloque resulto significativo, se eliminaron de todos los análisis las interacciones entre este factor y el resto de factores experimentales. Asimismo, en el apartado de resultados se muestran únicamente las interacciones hasta el tercer grado, ya que las de orden superior no resultaron significativas en la mayoría de los ANOVAs realizados. En todos los análisis se aplicó el método secuencial de Bonferroni, para disminuir la tasa de error de tipo I. Todos los análisis estadísticos realizados en este estudio se efectuaron con los programas StatView (SAS Institute Inc. 1998) y Super ANOVA.



Esquema 1: Parcela experimental en el IRTA unas semanas después de la plantación de *Pinus* y *Quercus* (A), parcela experimental en el IRTA unos meses después de la plantación de *Pinus* y *Quercus* (B), arrancamiento de las plántulas al final del experimento para evitar de romper las raíces (C).

Resultados

La aplicación del fango térmico mezclado con el suelo (FM) modificó significativamente el pH y contenido de nitrógeno (Tabla 5). En el suelo que se le aplicó el fango se observa una ligera disminución de pH respecto al suelo control (FM = 7.49 ± 0.04 , control = 7.68 ± 0.04) y un aumento del contenido de nitrógeno total (FM = $0.07 \pm 0.002\%$, control = $0.06 \pm 0.002\%$). Por lo que respecta a la materia orgánica (o su equivalente el carbono orgánico) y la salinidad, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos control y la aplicación de fango (materia orgánica: control = $1.04 \pm 0.05\%$ **a** y FM = $1.13 \pm 0.05\%$ **a**, y salinidad: control = $0.17 \pm 0.02\%$ **a** y FM = $0.18 \pm 0.01\%$ **a**). En ninguna de las variables analizadas se observó un efecto del paso del tiempo desde la aplicación del fango térmico (factor TIEMPO en Tabla 5)

Tabla 5 Valores F del test ANOVA de los efectos del bloque (B1, B2 y B3), aportación de fango térmico (C, FM) y del tiempo (diciembre (0 meses), julio (7 meses), octubre (10 meses) sobre el pH, nitrógeno, materia orgánica, carbono orgánico y salinidad. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	pH	Nitrógeno	Materia orgánica	Salinidad
Bloque (B)	3.2	1.2	1.1	0.3
Fangos (F)	14.1	5.7	2.3	0.6
Tiempo (T)	4.6	2.9	3.3	1.2
F X T	1.2	1.3	0.6	2.5

La aplicación del fango térmico en el hoyo de plantación afectó a la supervivencia de las plántulas (Tabla 6). Tal y como se muestra en la Figura 2 la supervivencia disminuyó en el tratamiento con fango mezclado (FM), en comparación con en el tratamiento control, mientras que las plántulas en las que se aplicó el fango en el fondo del hoyo de plantación mostraban valores intermedios. En cuanto a la diferencia entre especies, la supervivencia final fue superior en *Q. humilis* y *P. nigra* en comparación con *Q. ilex* (*P. nigra* = $95.9 \pm 1.4\%$ **b**, *Q. humilis* = $95.6 \pm 2.1\%$ **b**, *Q. ilex* = $87.8 \pm 2.7\%$ **a**).

Tabla 6 Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), nivel de riego previo en vivero (R66 y R100) y del tratamiento de fango (C, FM y FF) sobre la supervivencia final. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	Supervivencia final
Especie (S)	6.5
Riego (R)	0.4
Fango (F)	6.5
S X R	2.8
S X F	3.3
R X F	4.1
S X R X F	3.3

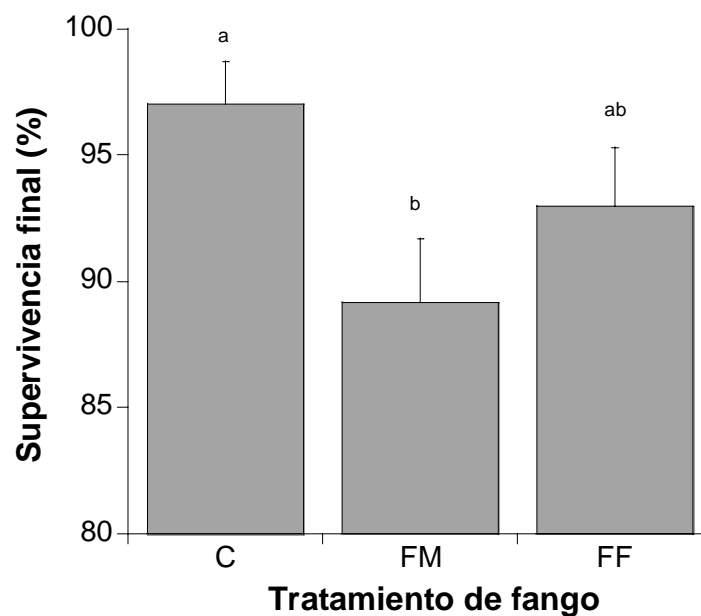


Figura 2 Media + ES del porcentaje de supervivencia final (%) en los tratamientos de abonado con fango térmico (C, FM y FF). Las distintas letras indican diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de fango según el test de Fisher

Entre las tres especies estudiadas, tanto el crecimiento en altura como en diámetro fue significativamente mayor en *P. nigra* en comparación con las dos especies de *Quercus* (altura: *Q. ilex* = 0.05 ± 0.04 cm **a**, *Q. humilis* = 0.1 ± 0.06 cm **a**, *P. nigra* = 0.5 ± 0.03 cm **b**; diámetro: *Q. ilex* = 0.3 ± 0.04 mm **a**, *Q. humilis* = 0.4 ± 0.04 mm **a**, *P. nigra* = 0.6 ± 0.03 mm **b**) respectivamente. Sin embargo en ninguna de las especies estudiadas el crecimiento de las plántulas se vio modificado por los diferentes tratamientos de riego recibidos previamente en vivero (R66 y R100), ni por la aplicación del fango térmico en campo (C, FM y FF) (Tabla 7). Contrariamente, si existió un efecto significativo de los tratamientos de fango sobre el crecimiento en biomasa, con un mayor crecimiento de las plántulas en las que se depositó fango térmico en el fondo del hoyo de plantación (FF) con respecto a los dos otros tratamientos (C y FM) (Figura 3). Asimismo existieron también diferencias entre especies, siendo el crecimiento mucho mayor en *P. nigra* y *Q. humilis* que en *Q. ilex* (*Q. ilex* = 0.3 ± 0.04 g.g⁻¹ **a**, *Q. humilis* = 0.8 ± 0.06 g.g⁻¹ **b**, *P. nigra* = 1.2 ± 0.04 g.g⁻¹ **b**).

Tabla 7 Valores F del test ANOVA de los efectos del bloque (B1, B2 y B3), de la especie (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), del riego (R66 y R100) y del tratamiento de aportación de fango térmico (C, FM y FF) sobre el crecimiento relativo en altura, crecimiento relativo en diámetro y el crecimiento relativo en biomasa. En negrita se muestran los coeficientes significativos después de aplicar el método secuencial de Bonferroni.

Fuente de variación	Crecimiento relativo altura	Crecimiento relativo diámetro	Crecimiento relativo biomasa
Bloque (B)	0.4	3.0	1.4
Especie (S)	28.7	16.6	98.5
Riego (R)	4.1	2.1	3.6
Fangos (F)	2.4	1.0	4.9
S X R	0.4	1.0	0.4
S X F	1.0	2.3	2.7
R X F	0.3	0.4	0.3
S X R X F	1.2	1.0	0.5

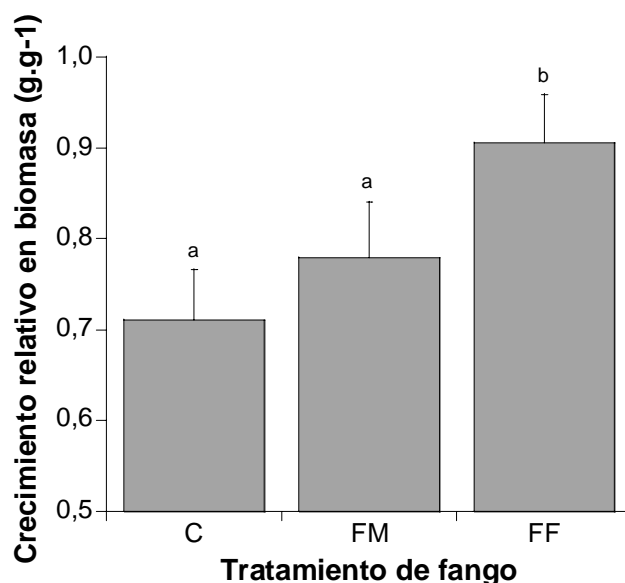


Figura 3 Media + ES del crecimiento relativo en biomasa en los tratamientos de aportación de fango térmico (C, FM y FF).

Por lo que respecta a la asignación de biomasa entre órganos (raíces, tallo y hojas), los diferentes tratamientos de riego (R66 y R100) aplicados previamente en vivero modificaron significativamente el root/shoot de las plántulas, aunque existieron diferencias entre las tres especies estudiadas (interacción especie x riego Tabla 8). *P. nigra* y *Q. humilis* mantuvieron un root/shoot similar entre los dos diferentes tratamientos previos de riego en vivero, mientras que *Q. ilex* mostró un root/shoot significativamente más alto en el tratamiento R66 en comparación con el tratamiento R100 (Figura 4). Asimismo, la aplicación de fango térmico en el hoyo de plantación provocó una disminución significativa de la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea de las plántulas en comparación con el tratamiento control (Tabla 8, Figura 5). En todos los tratamientos el root/shoot aumentó significativamente entre julio (0.8 ± 0.04) y octubre (1.2 ± 0.08), probablemente por efecto del estrés hídrico estival.

Tabla 8 Valores F del test ANOVA de los efectos del bloque (B1, B2 y B3), de la especie (*P. nigra*, *Q. ilex* y *Q. humilis*), del riego (R66 y R100), del tratamiento de aportación de fango térmico (C, FM y FF) y del tiempo (julio y octubre) sobre diversas variables: root/shoot (R/S), biomasa total, RWR, SWR, LWR y clorofila (solo en el caso de los *Quercus*). Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	R/S	Biomasa Total	RWR	SWR	LWR	Clorofila
Bloque (B)	0.6	2.7	0.6	0.4	0.5	0.6
Especie (S)	68.8	56.4	0.5	0.0	0.7	127.4
Riego (R)	10.3	4.3	2.4	3.7	1.1	6.3
Fangos (F)	7.8	2.9	1.3	2.2	1.1	7.4
Tiempo (T)	32.4	27.4	0.5	2.0	0.0	13.0
S X R	6.1	0.9	1.3	1.8	0.4	4.0
S X F	2.4	3.2	0.3	0.5	0.2	0.6
S X T	3.7	1.0	0.3	0.4	0.3	1.6
R X F	1.3	0.3	0.7	0.7	0.5	0.6
R X T	2.5	1.5	1.0	0.2	1.2	0.4
S X R X F	1.9	0.1	2.0	2.9	1.0	1.3
S X R X T	0.6	1.2	1.9	0.8	2.2	0.8
S X F X T	0.7	3.5	0.5	0.6	0.9	0.5
R X F X T	0.1	0.2	4.6	4.7	4.1	2.7

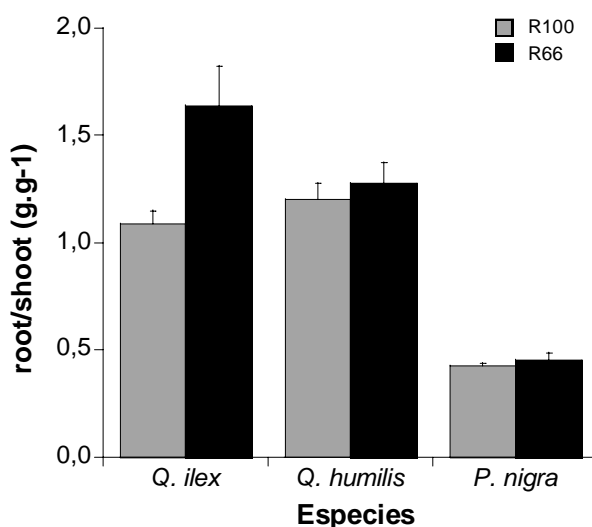


Figura 4 Media + ES del root/shoot en plantas de *Q. ilex*, *Q. humilis* y *P. nigra* en los dos tratamientos previos con diferente nivel de riego en vivero (R66 y R100).

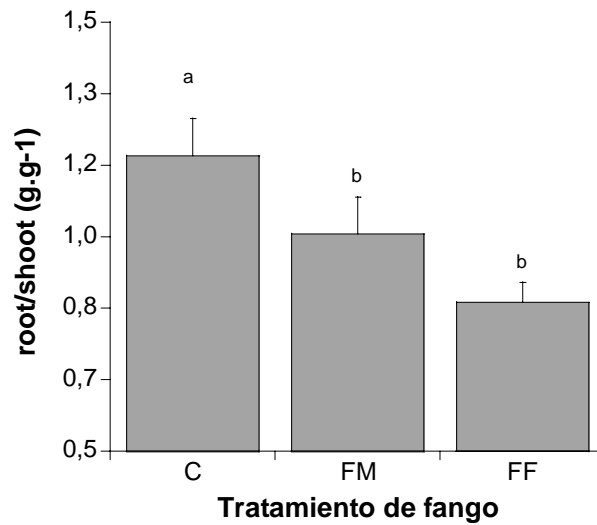


Figura 5 Media + ES del root/shoot de las plántulas tratamiento de aportación de fango térmico (C, FM y FF).

Además de las modificaciones en el patrón de asignación de biomasa, en el momento de arrancar las plántulas se constató que la arquitectura del sistema radicular era diferente según el tipo de tratamiento de aplicación de fango térmico recibido (C, FM y FF). Tal y como puede observarse en la Figura 6, las raíces de los controles se desarrollaron normalmente en todo el volumen de suelo (Figura 6-C), en el caso de las raíces del tratamiento de fango mezclado con el suelo las raíces crecieron preferentemente de modo vertical y hacia abajo (Figura 6-FM), y en las plántulas en las que se depositó el fango térmico en el fondo del hoyo de plantación (FF) la raíces se desarrollaron únicamente de modo lateral (Figura 6-FF).

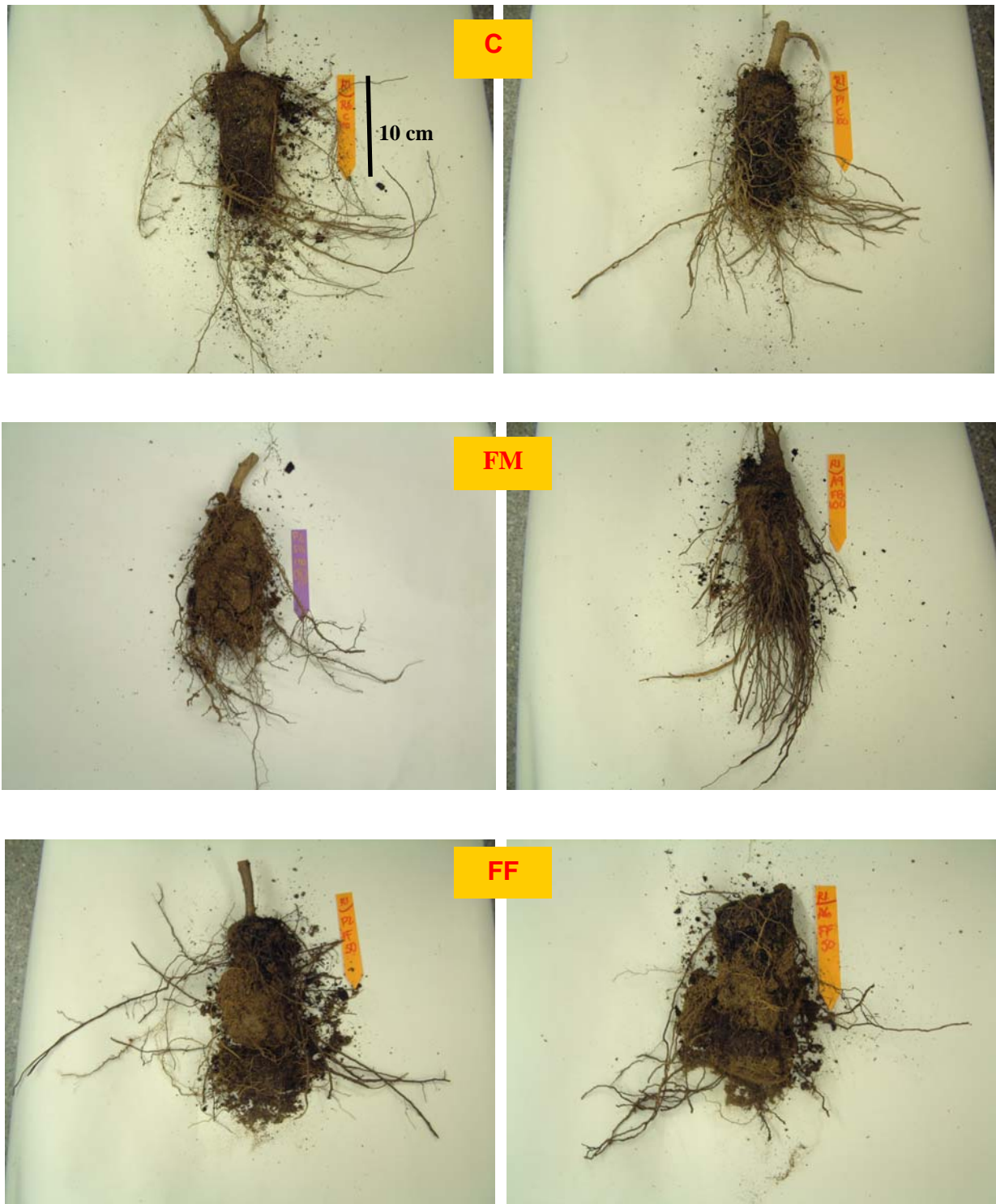


Figura 6 Arquitectura del sistema radicular en plántulas que recibieron el tratamiento control (C), el tratamiento de aplicación de fango térmico mezclado con suelo (FM), y depositado en el fondo del hoyo de plantación (FF).

Las medidas de la fluorescencia de la clorofila resultaron significativamente diferentes según la especie y el tratamiento de aplicación de fango (Tabla 7). Entre especies, resultaron superiores en *Q. ilex* que en *Q. humilis* (*Q. ilex* = 44.2 ± 0.6 **a**, *Q. humilis* = 36.5 ± 0.4 **b**), con un aumento de esta diferencia en el segundo muestreo (octubre). Con respecto a la aplicación de fango, las plántulas a las que aplicamos fango térmico (FM y FF) mostraron unos valores de fluorescencia de la clorofila más altos en comparación con las controles (Figura 7).

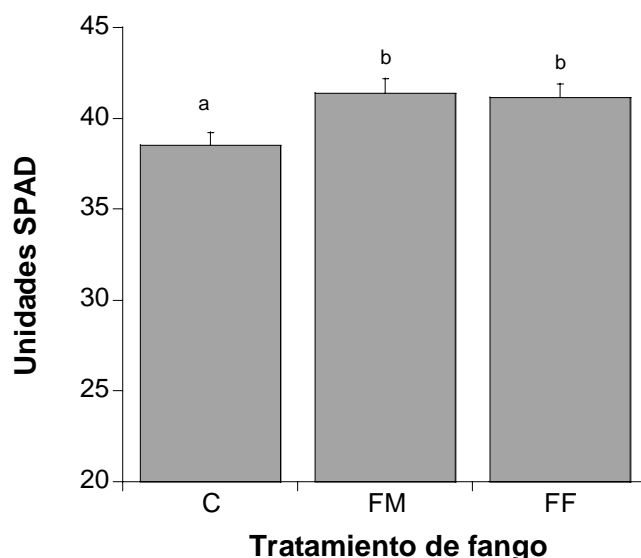


Figura 7 Media + ES de las unidades SPAD en los tratamientos de fango (C, FM y FF).

Discusión

Los post-tratamientos (compostaje, secado térmico) a los que se someten los fangos influyen en sus propiedades físicas, disponibilidad de nutrientes (Tarrasón 2004) e incluso en la toxicidad de los contaminantes presentes (Andrés y Domene 2005). Una vez los residuos orgánicos son incorporados al suelo, van liberando nutrientes de manera lenta a medida que se va mineralizando la materia orgánica. Los fangos de depuradora, a pesar de ser considerados abonos orgánicos, presentan una liberación bastante rápida de los nutrientes (Tarrasón 2004). En nuestro estudio, la aportación del fango térmico provocó un incremento significativo de la cantidad de nitrógeno total del suelo y una ligera disminución del pH respecto a los controles aunque no influyó en la cantidad de materia orgánica ni en la salinidad. La ausencia de efecto sobre la cantidad de materia orgánica puede relacionarse con la dosis más bien baja de fango aplicado (equivalente a 100 kg N por ha), o a un contenido previo de materia orgánica en el suelo relativamente elevado antes de la aplicación del fango, al tratarse de un suelo de origen agrícola. Por ello, en este caso no se

observan grandes mejoras en las propiedades químicas del suelo como se han detectado después de la aplicación de fangos en otros estudios (Albaladejo y Díaz 1990, García et al. 1994). El enfoque de este trabajo hacia la mejora de las condiciones del suelo en plantaciones forestales hizo que se descartara la aplicación de fango térmico a dosis elevadas, tanto atendiendo a los requerimientos de las especies utilizadas como a aspectos medioambientales.

Por lo que respecta al efecto de la aplicación del fango sobre el material vegetal, se observó hasta cierto punto un conflicto entre la supervivencia y el crecimiento de las plántulas. Las plántulas sometidas al tratamiento fango mezclado con el suelo del hoyo de plantación mostraron una disminución en supervivencia en comparación con los otros tratamientos de campo (Figura 2). Estas plantas mostraron un patrón de crecimiento de la raíz vertical y en profundidad debido probablemente al contacto lateral de la raíz con el suelo enriquecido con el fango térmico. Este patrón de “evitación” en el desarrollo radicular coincide bastante con otros experimentos en los que se observó en plántulas sometidas a tratamientos de fertilización con abono inorgánico introducido en el hoyo de plantación, una evitación del contacto con el fertilizante por parte de las raíces (ver Jacobs et al. 2004). A diferencia de lo sucedido en las plantas crecidas en suelo mezclado con fango, en las que se aplicó el fango en el fondo del hoyo de plantación se observó una supervivencia similar al tratamiento control (Figura 2). En estas plantas las raíces se desarrollaron lateralmente (Figura 6), evitando el contacto excesivo con el fango aplicado, y de allí se debe quizás la mayor supervivencia de las plántulas de este tratamiento. En cuanto al crecimiento, y a diferencia del efecto negativo observado sobre la supervivencia, la aportación al suelo del fango térmico favoreció un aumento en el contenido en clorofila e incluso un mayor crecimiento en biomasa de las plantas que recibieron el tratamiento de fango al fondo. El aumento en la concentración de clorofila puede atribuirse a la mayor disponibilidad de nitrógeno, hierro y micronutrientes en el suelo fertilizado (Rodríguez et al. 1998).

Cabe destacar que el aumento en el crecimiento de las plántulas que recibieron la aplicación de fango no coincidió con un aumento en su altura y diámetro, lo que sugiere que este mayor crecimiento afectó sobretudo al compartimiento foliar. Este mayor potencial de desarrollo contrasta con otros estudios en los que la aplicación de los fangos de depuradora en plantaciones forestales no dieron resultados, o bien éstos fueron negativos, debido a la toxicidad y desequilibrios nutricionales provocados (Arduini et al. 1994). Respecto al patrón de asignación de biomasa entre órganos, nuestros resultados indican los cambios que estos tratamientos con fango pueden provocar, disminuyendo la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea (ver también, Valdecantos 2001). Según Rodá et al. (1999) ésta preferente asignación de recursos al crecimiento aéreo es un fenómeno asociado a la disponibilidad de recursos edáficos en las primeras fases de la fertilización. Cabe destacar también, que no hubo ninguna interacción significativa entre el tratamiento previo de riego en vivero y el tratamiento de campo, lo que puede

ser debido a la poca diferencia en cuanto a la biomasa de las raíces entre los dos niveles de agua aplicados (ver Tabla 1).

Los resultados obtenidos en el presente estudio sugieren un efecto positivo en la aplicación de fango térmico en el hoyo de plantación de plántulas de especies forestales. Este tratamiento favorece un aumento del porcentaje de nitrógeno presente en el suelo, mejora el contenido de clorofila y estimula el crecimiento en biomasa de las plántulas. Además de estos beneficios el fango térmico cuenta con las ventajas de un menor volumen, facilidad de aplicación y sobre todo menor coste de transporte. No obstante, esta misma aplicación puede conllevar una disminución de la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea, además de reducir la supervivencia de las plántulas (hasta un 11% menos) cuando el fango se mezcla con el suelo procedente del hoyo de plantación. En este sentido es necesario seguir profundizando sobre los efectos de la fertilización con fango térmico, sobretodo en aquellos aspectos que se relacionan con la dinámica de la materia orgánica y el tipo de aplicación que puede promover un mejor balance entre las expectativas de supervivencia y crecimiento (en nuestro caso la aplicación en el fondo del hoyo de plantación). Asimismo, a causa de la disminución de la biomasa radicular y el cambio en la arquitectura de las raíces que promueve la aplicación del fango, sería interesante combinarlo con otros tratamientos que pudieran corregir la disminución del root/shoot o bien aplicarlo en superficie para evitar de esta manera el contacto creciente de la raíz con el fango térmico (ver capítulo 4).

Bibliografía

Adesodun JK, Davidson DA, Hopkins DW (2005) Micromorphological evidence for changes in soil faunal activity following application of sewage sludge and biocide. *Applied Soil Ecology* 29:39-45

Albaladejo J, Díaz E (1990) Degradación y regeneración del suelo en el litoral Mediterráneo Español. Experiencias en el proyecto LUCDEME. En: *Soil degradation and rehabilitation in Mediterranean Environmental Conditions*. Albaladejo, Stocking y Díaz (Eds). CSIC. Murcia 191-214

Andrés P, Domene X (2005) Ecotoxicological and Fertilizing Effects of Dewatered, Composted and Dry Sewage Sludge on Soil Mesofauna: A TME Experiment. *Ecotoxicology* 14(5):545-57

Arduini I, Godbold DL, Onnis A (1994) Cadmium and Copper change root growth and morphology of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* seedlings. *Physiologia Plantarum* 92:675-680

Biel C, Savé R, Habrouk A, Espelta JM, Retana J (2004) Effects of restricted watering and CO₂ enrichment in the morphology and transplant performance of nursery grown *Pinus nigra* seedlings. *Hort. Science* 39:1-6

Coppenet M, Juste C (1987) Oligoelementos indispensables para la vida de las plantas. Fenómeno de toxicidad. En: Edafología. 2. Constituyentes y propiedades del suelo. Bonneau, M. y B. Souchier. Masson, S. A. 410-418

Domene X (2004) Avaluació de la utilitat del bioassaig amb el *col·lèmbol Folsomia candida* en l'estimació del potencial ecotoxicològic per als sòls dels fangs de depuradora. Treball de recerca. Universitat Autònoma de Barcelona

Düring RA, Gäth S (2002) Utilization of municipal wastes in agriculture: where do we stand, where will go? Journal Plant Nutrition Soil Science 165:544-556

European Commission (2002). Comunicación de la comisión al consejo, el parlamento europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. Bruselas.

García C, Hernández T, Costa F, Ceccanti B (1994) Biochemical parameters in soils regenerated by the addition of organic matter. Waste Management and Research 12:457-466

Jacobs DF, Rose R, Haase DL, Alzugaray PO (2004) Fertilization at planting impairs root system development and drought avoidance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. Annals Forest Science 61:643-651

Kimberley MO, Wang H, Wilks PJ, Fisher CR, Magesan GN (2004) Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. Forest Ecology and Management 189:345-351

Naoum C, Zorpas A, Savvides C, Haralambous KJ, Loizidou M (1998) Effects of thermal and acid treatment on the distribution of heavy metals in sewage sludge. Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering 33:1741-1751

Navas A, Machín J, Navas B (1999) Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). Bioresource Technology 69:199-205

Ojeda G, Alcañiz JM, Ortiz O (2003) Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. Land Degradation and Development 14:563-573

Ortiz O (1998) Activitat biològica en sòls de pedrersde calcària restaurats amb fangs de depuradora. Tesis Doctoral, Universidad Autònoma de Barcelona

Petersen SO, Henriksen K, Mortensen GK, Krogh PH, Brandt KK, Sorensen J, Madsen T, Petersen J, Gron C (2003) Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility. *Soil and Tillage Research* 72:139-152

Piñol J, Terradas J, Lloret F (1998) Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climate Change* 38:345-357

Robinson MB, Polglase PJ, Weston CJ (2002) Loss of mass and nitrogen from biosolids applied to a pine plantation. *Australian Journal of Soil Research* 40:1027-1039

Robinson MB, Röper H (2003) Volatilisation of nitrogen from land applied biosolids. *Australian Journal of Soil Research* 41:711-716

Rodà F, Mayor X, Sabaté S, Diego V (1999) Water and nutrient limitations to primary production. En: *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Rodà, F, Retana, J., Gracia, C. A., Bellot, J. (eds). *Ecological studies* 137:183-194. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

Rodríguez N, Alcántar G, Aguilar AS, Etchevers J, Santizó A (1998) Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra* 16:135-141

Savé R, Biel C, Domingo R, Ruiz Sánchez MC, Torrecillas A (1995) Some physiological and morphological characteristics of citrus plants for drought resistance. *Plant Science* 110:167-172

Seva JP, Vilagrosa A, Valdecantos A, Cortina J, Vallejo VR, Bellot J. (1996) Mycorrhization et application de compost urbain pour l'amélioration de la survie et de la croissance des semis de *Quercus ilex* ssp. *ballota* en milieu sec. to *Options Méditerranéennes*. Ref Type: Internet Communication

Smith MTE, Tibbett M (2004) Nitrogen dynamics under *Lolium perenne* after a single application of three sewage sludge types from the same treatment stream. *Bioresourcetchnology* 91:233-241

Sort X, Alcañiz JM (1996) Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries. *Land Degradation and Development* 10:3-12

Sort X, Alcañiz JM (1999) Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation and Development* 10:3-12

StatView (1999) by SAS Institute Inc

Tarrasón D (2004) Alternatives de fertilizació per a la rehabilitació de sòls degradats: aplicació de fang fresc, compostat i d'assecatge tèrmic. Tesis Doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona

Trabaud L (1991) Le feu est-il un facteur de changement pour les systèmes écologiques du bassin méditerranéen? *Sécheresse* 2:163-174

Valdecantos A, Vilagrosa A, Seva JP, Cortina J, Vallejo VR, Bellot J. (1996) Mycorrhization et application de compost urbain pour l'amélioration de la survie et de la croissance des semis de *Pinus halepensis* en milieu semi-aride. to *Options Méditerranéennes* . Ref Type: Internet Communication

Valdecantos A (2001) Aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la repoblación de zonas forestales degradadas de la Comunidad Valenciana. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante

Valdecantos A, Fuentes D, Cortina J (2004) Utilización de biosólidos en la restauración forestal. *Avances en el estudio de la gestión del monte Mediterráneo Fundación CEAM*: 313-344

Vallejo VR, Bautista S, Cortina J (2000) Restoration for soil protection after disturbances. En: *Life and environment in the Mediterranean* Trabaud, L. (ed.) 301-343, WIT Press

Villar-Salvador P, Ocaña L, Peñuelas J, Carrasco I (1999) Effect of water stress conditioning on the water relations, root growth capacity, and the nitrogen and non-structural carbohydrate concentration of *Pinus halepensis* Mill. (Aleppo pine) seedlings. *Annals Forest Science* 56:459-465

WRB (1999) World reference base for soil resources FAO/ISRIC/ISSS. Rome: World Soil Resources Rep. 84. FAO

Capítulo 4

Respuesta de las plántulas de Pinus nigra y Pinus pinaster procedentes de diferentes condiciones ambientales en vivero a la aplicación de fango térmico y tubos protectores en la reforestación de una zona quemada.

Introducción

Los incendios forestales han sido considerados tradicionalmente una de las principales perturbaciones naturales que afecta a los ecosistemas forestales de la Cuenca Mediterránea (Trabaud 1981). Sin embargo en los últimos años se ha producido un aumento en la importancia de estas perturbaciones, con un espectacular incremento en su frecuencia, pero sobre todo, con la aparición de un fenómeno complejo, como son los incendios forestales de grandes dimensiones (Terradas 1996, Pausas y Vallejo 1999). El aumento del número y de las dimensiones de estos grandes incendios pueden generar importantes dificultades al proceso de regeneración natural (Espelta et al. 2002, Ordoñez 2004), especialmente en aquellas especies que carecen de la habilidad de rebrotar o de mantener bancos de semillas. Las enormes distancias entre las zonas centrales y los márgenes del incendio hacen que la probabilidad de recolonización de las zonas más interiores sea realmente baja o incluso localmente nula (Retana et al. 2002). Estas circunstancias pueden favorecer una disminución en el área de distribución de algunas especies (ej. *P. nigra* en Espelta et al. 2002, *J. phoenicea* en Quevedo 2005). En el caso de *P. nigra* se ha estimado que los grandes incendios que afectaron a esta especie en 1994 y 1998 en extensas zonas de Cataluña han reducido en más de un 30% su área de distribución en el NE de la Península Ibérica (Espelta et al. 2002). *Pinus nigra* presenta una elevada sensibilidad a los incendios forestales pues su corteza es menos gruesa que en otros pinos, las semillas no resisten elevadas temperaturas (Habrouk et al. 1999), pero sobretodo debido al hecho de que la dispersión de piñones se realiza en enero-febrero de manera que los incendios eliminan prácticamente la totalidad las plántulas recién germinadas (Ordoñez 2004).

Ante estos escenarios de nula regeneración natural es preciso recorrer a otros medios como las repoblaciones artificiales, con el fin de asegurar una suficiente cantidad y calidad de cubierta vegetal a medio y largo plazo (Barberá et al. 2005), así como paliar las graves consecuencias socioeconómicas de estos grandes incendios forestales. Durante la fase de establecimiento en campo, las plántulas pueden experimentar periodos de estrés hídrico (Villar-Salvador et al. 1998), lo que puede limitar su desarrollo (South y Mexal 1984). Por este motivo, se han estudiado diferentes técnicas de como mejorar y acelerar la implantación de la vegetación, centradas en la utilización de diferentes tipos de aditivos para mejorar las características del suelo (Pausas et al. 2004), que permitan reducir el choque del trasplante y acelerar el crecimiento inicial de la plantación (Jacobs et al. 2004). El uso de enmiendas orgánicas en la preparación de terrenos a reforestar ha dado buenos resultados promoviendo la supervivencia y el crecimiento de las plántulas (Querejeta et al. 2001, Jacobs et al. 2005). Algunas experiencias de fertilización de diferentes especies vegetales forestales mediterráneas han revelado que el fósforo es el nutriente más limitante para el desarrollo vegetal (Fons y Vallejo 2000, Valdecantos 2001). Sin embargo,

existen otras comunidades vegetales que han mostrado mayor respuesta a la fertilización nitrogenada (Sabaté y Gracia 1994). Además en ambientes donde el agua es deficitaria, como es el caso en las zonas mediterráneas, se ha observado que la adición de materia orgánica a los suelos ayuda de manera determinante no únicamente a mejorar la fertilidad de los mismos, si no a incrementar su capacidad de retención de agua (Cuevas et al 2001). En este contexto, se ha incrementado el número de estudios que han evaluado la potencial utilización de fangos procedentes de depuradora para este tipo de aplicaciones (Sort y Alcañiz 1999, Robinson et al. 2002, Adesodun et al. 2005), si bien existen pocos datos sobre la posibilidad de utilizar fangos previamente sometidos a un secado térmico y de que manera las condiciones en que han crecido las plántulas en el vivero puede afectar el tipo de respuesta a este tratamiento (ver para condiciones experimentales controladas el capítulo 3).

El objetivo de este estudio has sido evaluar en condiciones de campo el efecto de la adición de fango térmico, durante el proceso de plantación, sobre la supervivencia y el crecimiento de plántulas de dos especies de pino, *P. nigra* y *P. pinaster* ampliamente utilizadas en los programas de reforestación de zonas afectadas por grandes incendios en el NE de la Península Ibérica. Asimismo se ha evaluado sobre estos parámetros la influencia de los tratamientos previos de vivero, consistentes en cambios en la temperatura y la concentración de CO₂ atmosférico y del resguardo de las plántulas mediante tubos protectores en campo, puesto que: i) de los diferentes tratamientos que se aplican para mejorar simultáneamente la producción en vivero y la aceleración del crecimiento, el uso de cambios en la temperatura y del CO₂ han generado buenos resultados (véase capítulo 2) ii) diferentes autores han señalado el potencial beneficio en el uso de tubos tanto como protección contra los herbívoros (Tuley 1985, Black 1992) como por el efecto estimulador del crecimiento en estas condiciones (Potter 1991, Smith 1993, Savé et al. 1994).

Material y métodos

Material vegetal

Las plántulas utilizadas fueron las mismas que se describen en el experimento del capítulo 2 y a las que se aplicaron diferentes tratamientos de vivero que consistieron en:

- (T: temperatura). Las plántulas recibieron un aumento de la temperatura ambiental, conservando a lo largo de todo el experimento una temperatura mínima de 12-13°C.
- (T+CO₂: temperatura + CO₂) Estas plantas además del aumento de la temperatura, recibieron un abonado carbónico atmosférico de 550-700 ppm de CO₂ industrial.

- (C: control). Las plántulas recibieron las condiciones estándar de vivero sin aumento de temperatura ni CO₂.
-

Para más detalles sobre estos tratamientos en vivero, véase el capítulo 2.

Área de estudio

Este estudio se ha llevado a cabo tres años después del gran incendio forestal ocurrido en el verano de 1998 en la comarca del Bages, más específicamente en Castelltallat (41° 46' 38.5841" N, 1° 36' 49.8791" E, Cataluña, NE España) (Esquema 1-A-B). El clima en esta zona es seco-subhúmedo según el índice de Thornthwaite, con una temperatura media anual de entre 10 y 13°, y precipitación anual entre 550 y 750mm. El incendio en la zona oeste del Bages afectó a 3012 ha forestales arboladas. En la zona afectada y de acuerdo con los datos del Inventario Ecológico Forestal de Cataluña (IEFC 2000), en la mayoría de las áreas dominaban *P. nigra* (72%), *P. halepensis* (24%) y *Q. ilex* (4%) antes del incendio (Gracia et al. 2000).

Diseño experimental

En la primavera del 2002, después de recibir los tratamientos previos de vivero (véase el capítulo 2), se distribuyeron al azar 190 plántulas (Esquema 1-C) entre los diferentes tratamientos de vivero (C, T y T+CO₂) y las dos especies de pino (*P. nigra* y *P. pinaster*). Estas plántulas fueron plantadas en tres parcelas localizadas a lo largo de la zona quemada (Figura 1) de exposiciones diferentes (NE, S y SW) y de aproximadamente una hectárea cada una.

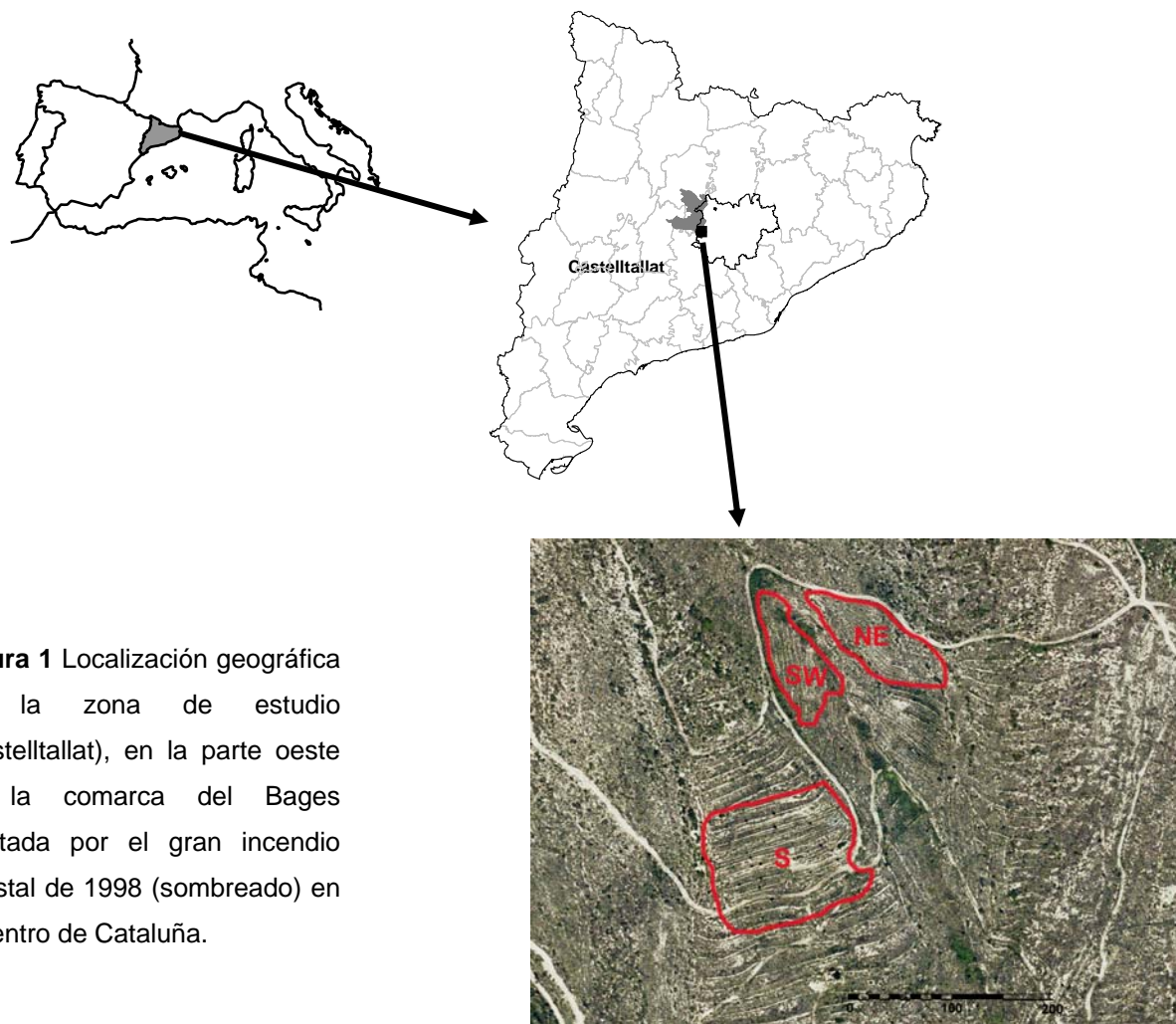


Figura 1 Localización geográfica de la zona de estudio (Castelltallat), en la parte oeste de la comarca del Bages afectada por el gran incendio forestal de 1998 (sombreado) en el centro de Cataluña.

En cada una de las tres parcelas se establecieron con tractor unos surcos de plantación a una distancia de 1 a 1,5 metros entre ellas. En el momento de plantar, a lo largo de las líneas se distribuyeron al azar los pinos de los diferentes tratamientos previos de vivero (T, T+CO₂ y C) a lo largo de tres réplicas por parcela. Dos semanas después de la plantación se aplicaron factorialmente los tratamientos de campo que consistieron en:

Tratamiento de adición de fango térmico (TF):

- Plántulas con fango (+F): a una cuarta parte de las plántulas de cada especie (*P. nigra* y *P. pinaster*) se le aplicó en superficie 100g de fango térmico (producto de textura granular menor a 2 mm cuya composición se detalla en la Tabla 2 del capítulo 3).
- Plántulas controles sin fango (-F): la segunda cuarta parte de las plántulas de cada especie de pino no recibió tratamientos de fango.

Tratamiento de protección con tubo (TP):

- Plántulas con tubo (+T): la tercera cuarta parte de las plántulas de cada especie se le puso un tubo protector de unos 80 cm de altura (Esquema 1D).

- Plántulas controles sin tubo (-T): la última cuarta parte de las plántulas de cada especie de pino no se le puso un tubo protector.

La distribución de los dos tratamientos de campo aplicados se muestra en la Figura 2.

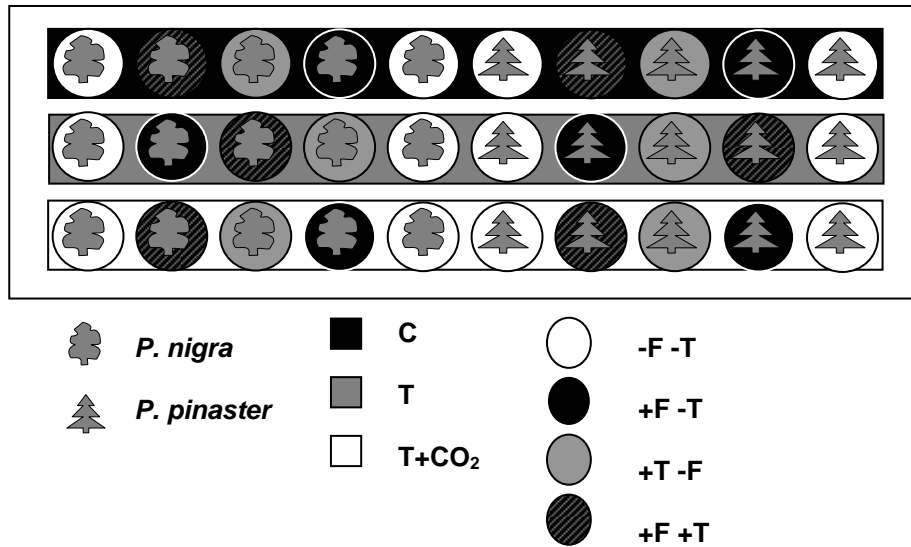


Figura 2 Diseño experimental realizado en el área de estudio. El esquema muestra las diferentes combinaciones para las dos especies de pino (*P. nigra* y *P. pinaster*), de los tres tratamientos previos de vivero (C, T y T+CO₂) y los diferentes tratamientos de campo aplicados (Control (-F -T), fango (+F -T), tubo (+T -F) y fango-tubo (+F +T)).

Desde que empezó el experimento en la primavera del 2002 hasta el otoño del 2004, y con el fin de evaluar el comportamiento de las plántulas estacionalmente, determinamos en invierno y a finales de cada año (2002, 2003 y 2004) la supervivencia de todas las plántulas. A partir de las medidas de supervivencia hechas, se calculó el porcentaje de la supervivencia final, pero también la tasa de supervivencia relativa entre periodos. Además de la supervivencia se evaluó a lo largo del tiempo los cambios en la altura y diámetro de las plántulas. Estas medidas se hicieron la primera vez, justo después de plantar las plántulas en primavera (abril 2002), se repitieron en el invierno 2003, y finalmente en el invierno del 2004. A partir de estas diferentes variables se calcularon las tasas de crecimiento relativo en altura (RGR altura final: $\ln(\text{Altura final}) - \ln(\text{Altura inicial}) / \text{tiempo transcurrido en meses}$), y del diámetro (RGR diámetro final: $\ln(\text{Diámetro final}) - \ln(\text{Diámetro inicial}) / \text{tiempo transcurrido en meses}$).

Análisis estadísticos

Al final del experimento (32 meses), el efecto de la ESPECIE (*P. nigra* y *P. pinaster*), TRATAMIENTO PREVIO DE VIVERO (C, T y T+CO₂), EXPOSICIÓN (NE, S y SW), TRATAMIENTO de PROTECCIÓN (+T, -T) y TRATAMIENTO FANGO (+F, -F) sobre la supervivencia final de las plantas se analizó mediante un ANOVA de 5 factores. La variable de porcentaje de supervivencia fue transformada en arcoseno de la raíz cuadrada. Por otro lado, para valorar la incidencia de estos factores a lo largo del tiempo, se analizó su efecto sobre la supervivencia relativa determinada a finales de cada año (2002, 2003 y 2004) mediante un ANOVA de medidas repetidas. Debido a la gran mortalidad de las plántulas de la combinación +T+F, en los análisis sobre el crecimiento de las plántulas se agruparon los tratamientos de protección (+T y -T) y de fango (+F y -F) en un solo tratamiento que llamamos "tratamiento de campo" (Control: -T-F, Fango: -T+F y Tubo: +T-F). Por este motivo, las diferentes variables calculadas del crecimiento relativo en altura final (RGR: $\ln(\text{altura final}/\text{altura inicial})$), crecimiento relativo en diámetro final (RGR: $\ln(\text{diámetro final}/\text{diámetro inicial})$) se analizaron mediante ANOVAs de solamente 4 factores: ESPECIE (*P. nigra* y *P. pinaster*), TRATAMIENTO PREVIO DE VIVERO (C, T y T+CO₂), EXPOSICIÓN (NE, S y SW), y el TRATAMIENTO DE CAMPO (C, F y T). Para más información sobre el efecto en el tiempo de estos factores en el crecimiento relativo en altura y diámetro, se analizó el efecto de ESPECIE, TRATAMIENTO PREVIO DE VIVERO, EXPOSICIÓN, y TRATAMIENTO DE CAMPO sobre el RGR altura y RGR diámetro en los diferentes periodos (2002, 2003, 2004) mediante un ANOVA de medidas repetidas. Todos los análisis estadísticos realizados en este estudio se efectuaron con el programa StatView (SAS Institute Inc. 1998)



Esquema 1: Zona del Bages (Castelltallat) 4 años después del gran incendio (A), plántulas de *Pinus* antes de la plantación (B), y después de la plantación (C), plántula de *Pinus* protegida con un tubo (D).

Resultados

Tanto el tratamiento aplicado previamente en vivero (C, T y T+CO₂), como el tratamiento de protección (+T y -T) modificaron significativamente la supervivencia final. Además existieron diferencias importantes entre las dos especies de pino (*P. nigra* y *P. pinaster*) (Tabla 1). Por lo que respecta a la supervivencia entre especies, las plántulas de *P. nigra* sobrevivieron más en comparación a las de *P. pinaster* (*P. nigra* = 80.8 ± 2.2%, *P. pinaster* = 67.4 ± 2.8%). Con respecto a los tratamientos de vivero, la supervivencia de las plántulas que habían recibido una combinación de temperatura con abonado carbónico (T+CO₂) mostraron una supervivencia menor (67.1 ± 3.5% **b**) en comparación con las plántulas del tratamiento de temperatura y el control (T = 75.6 ± 2.8% **a**, C = 79.6 ± 3.0% **a**). Por lo que se refiere a los tratamientos aplicados en el campo, la interacción del tratamiento de protección con el tratamiento de fango nos indica que las plántulas que solo recibieron fango (+F) son las que sobrevivieron más en comparación con todas las otras combinaciones (Figura 3), mientras que las que obtuvieron peores resultados fueron las que recibieron el tratamiento de tubo protector y fango (+T, +F).

Tabla 1 Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra* y *P. pinaster*), tratamiento vivero (C, T y T+CO₂), exposición (NE, S y SW), tratamiento de campo protección (+T y -T) y tratamiento de fango (+F y -F) sobre la supervivencia final. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	Supervivencia final
Especie (S)	19.1
Tratamiento vivero (TV)	6.1
Exposición (E)	3.4
Tratamiento protección (TP)	23.4
Tratamiento fango (TF)	2.5
S X TV	1.0
S X E	0.2
S X TP	0.2
S X TF	3.2
TV X E	1.9
TV X TP	0.1
TV X TF	0.0
E X TP	0.5
E X TF	0.1
TP X TF	14.2

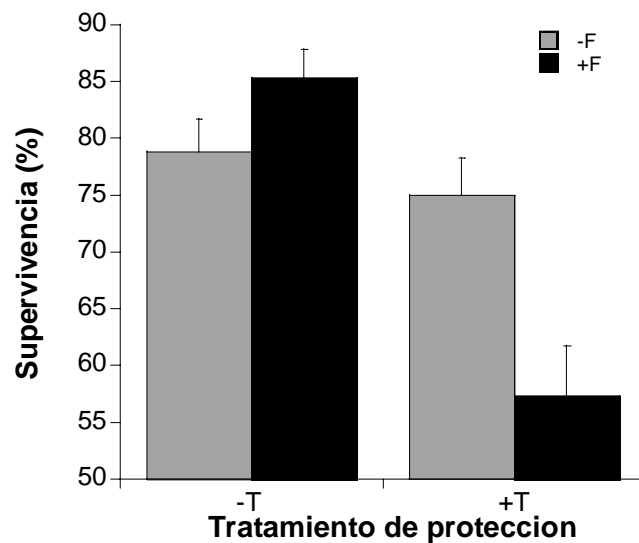


Figura 3 Medias \pm ES porcentaje de supervivencia final (%) de los tratamientos de fango (+F, -F) y de protecci3n (+T, -T).

Un an3lisis m3s detallado de la supervivencia relativa durante los diferentes a3os del estudio (2002, 2003 y 2004) mostr3 las mismas diferencias significativas en cuanto a las especies, tratamientos previos en vivero y tratamientos de campo, que el an3lisis de la supervivencia final (Tabla 2). Adem3s, este an3lisis mostr3 unas diferencias significativas entre los a3os (2002, 2003 y 2004), con una disminuci3n de la supervivencia los dos primeros a3os, en comparaci3n con el 3ltimo a3o de muestreo (2002 = $88.8 \pm 1.4\%$ **a**, 2003 = $85.5 \pm 1.5\%$ **a**, 2004 = $91.9 \pm 1.5\%$ **b**).

Tabla 2 Valores F del test ANOVA de medidas repetidas de los efectos de la especie (*P. nigra* y *P. pinaster*), tratamiento vivero (C, T y T+CO₂), exposición (NE, S y SW), tratamiento de campo protección (T y Ct) y tratamiento de fango (+F y -F) sobre la supervivencia relativa. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	Supervivencia
Especie (S)	15.3
Tratamiento vivero (TV)	5.8
Exposición (E)	1.7
Tratamiento protección (TP)	17.8
Tratamiento fango (TF)	6.6
S X TV	0.9
S X E	0.5
S X TP	0.3
S X TF	5.6
TV X E	2.4
TV X TP	0.4
TV X TF	0.7
E X TP	0.2
E X TF	0.2
TP X TF	15.8
Años (A)	11.6
A X S	11.7
A X E	6.0

Respecto a las diferencias en supervivencia relativa entre las dos especies de pino, la interacción años X especie mostró un mayor porcentaje de supervivencia de *P. nigra* que *P. pinaster* el primer año, mientras que los dos último años se mostró una similar supervivencia entre las dos especies (Figura 4).

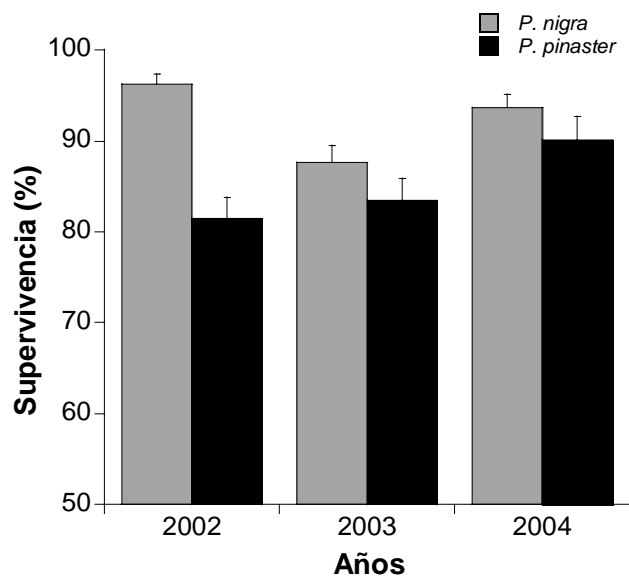


Figura 4 Media + ES de la supervivencia relativa de las plántulas de (*P. nigra* y *P. pinaster*) en el tiempo (2002, 2003 y 2004).

Finalmente, entre las diferentes exposiciones, la interacción años X exposición (Tabla 2) indicó que mientras en las exposiciones NE y SW la supervivencia era similar, en la exposición S era menor el segundo año (2003), en comparación con el primero (2002) y el último año de muestreo (2004) (Figura 5).

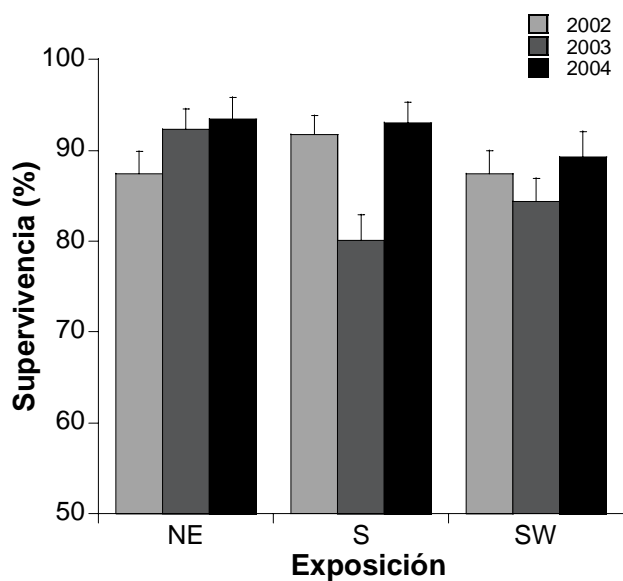


Figura 5 Media + ES de la supervivencia relativa de las plántulas en el tiempo (2002, 2003 y 2004) en las diferentes exposiciones (NE, S y SW).

Los diferentes tratamientos aplicados tanto previamente en vivero, como en el campo modificaron significativamente el crecimiento relativo en altura de las plántulas (Tabla 3) si bien existieron diferencias entre las dos especies estudiadas. Tal como se muestra en la Figura 6, a lo largo de los tres años las plántulas de *P. pinaster* crecieron más que las de *P. nigra*, y más en el tratamientos control (C) que en el de temperatura (T) y T+CO₂, disminuyendo las diferencias en el RGR en altura entre especies en el tratamiento con temperatura y abonado carbónico. Las diferentes exposiciones afectaron significativamente el crecimiento en altura, con un mayor RGR en altura en la exposición NE, respecto a las dos otras exposiciones (S y SW) (NE = 0.032 ± 0.001cm.mes⁻¹ **a**, S = 0.029 ± 0.001cm.mes⁻¹ **b**, SW = 0.028 ± 0.001cm.mes⁻¹ **b**). En cuanto a la aplicación de los diferentes tratamientos de campo, el RGR en altura fue mayor en las plántulas del tratamiento tubo (T), en comparación con los tratamientos control y fango (T = 0.040 ± 0.001 cm.mes⁻¹ **a**, F = 0.026 ± 0.001 cm.mes⁻¹ **b**, C = 0.024 ± 0.001 cm.mes⁻¹ **c**).

Tabla 3 Valores F del test ANOVA de los efectos de la especie (*P. nigra* y *P. pinaster*), tratamiento vivero (C, T y T+CO₂), exposición (NE, S y SW) y tratamiento de campo (C, F y T) sobre el RGR altura final y RGR diámetro final. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	RGR altura final	RGR diámetro final
Especie (S)	72.8	12.2
Tratamiento vivero (TV)	46.6	1.1
Exposición (E)	11.8	2.1
Tratamiento campo (TC)	244.7	23.5
S X TV	12.5	2.0
S x E	1.4	0.0
S X TC	3.8	1.2
TV X E	0.4	2.5
TV X TC	1.1	0.7
E X TC	2.0	0.5
S X TV X E	1.4	0.8
S X TV X TC	2.2	1.3
S X E X TC	2.7	0.2
TV X E X TC	0.9	0.8
S X TV X E X TC	2.1	0.5

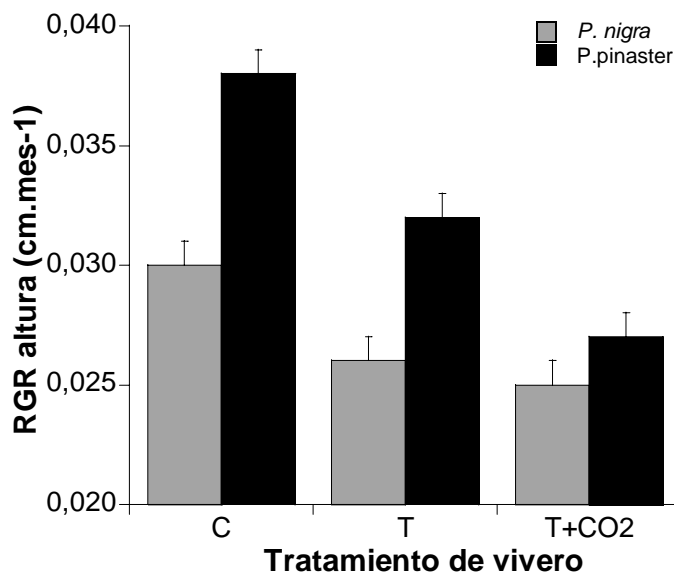


Figura 6 Media + ES del RGR de la altura final en las plántulas de (*P. nigra* y *P. pinaster*) en los tratamientos previos de vivero (C, T y T+CO₂).

En el caso del diámetro, solo la especie y el tratamiento aplicado en campo lo modificaron significativamente. Las plántulas de *P. nigra* mostraron un mayor RGR en diámetro, en comparación con las plántulas de *P. pinaster* (*P. nigra* = 0.032 ± 0.0 mm.mes⁻¹ **a**, *P. pinaster* = 0.030 ± 0.0 mm.mes⁻¹ **b**). Por otro lado, y contrariamente al crecimiento en altura, el RGR en diámetro de las plántulas del tratamiento tubo fue significativamente menor, en comparación con los otros tratamientos (C y F) (T = 0.028 ± 0.00 mm.mes⁻¹ **a**, F = 0.033 ± 0.00 mm.mes⁻¹ **b**, C = 0.032 ± 0.00 mm.mes⁻¹ **c**).

La comparación del crecimiento en altura y diámetro relativo durante los tres años del experimento, mostró diferentes interacciones entre los factores experimentales aplicados (Tabla 4). Respecto a la diferencia entre especies, la Figura 7 muestra que el RGR en altura fue superior en *P. pinaster* que *P. nigra* el primer y el segundo año después de la plantación (2002-2003), en comparación con el último año, donde el crecimiento en altura fue similar entre las dos especies.

Tabla 4 Valores F del test ANOVA de medidas repetidas de los efectos de la especie (*P. nigra* y *P. pinaster*), tratamiento vivero (C, T y T+CO₂), exposición (NE, S y SW) y tratamiento de campo (C, F y T) sobre RGR en altura y RGR en diámetro. Los coeficientes significativos después de utilizar el método secuencial de Bonferroni se muestran en negrita.

Fuente de variación	RGR altura	RGR diámetro
Especie (S)	66.8	14.7
Tratamiento vivero (TV)	39.9	1.1
Exposición (E)	9.9	1.5
Tratamiento campo (TC)	236.8	24.6
S X TV	12.6	2.1
S x E	1.2	0.0
S X TC	2.0	1.3
TV X E	0.4	2.4
TV X TC	1.0	0.7
E X TC	1.8	0.6
S X TV X E	1.1	0.9
S X TV X TC	2.1	1.4
S X E X TC	2.7	0.2
TV X E X TC	0.8	0.8
S X TV X E X TC	2.2	0.5
Tiempo (T)	223.1	291.8
T X S	37.7	15.0
T X TV	13.2	0.1
T X E	3.6	5.1
T X TC	57.2	16.7
T X S X TV	2.3	0.3
T X S X E	3.5	1.4
T X S X TC	42.8	1.5
T X TV X E	1.0	0.5
T X TV X TC	1.5	0.6
T X E X TC	0.3	2.0
T X S X TV X E	2.0	1.5
T X S X TV X TC	1.6	1.5
T X S X E X TC	1.1	0.1
T X TV X E X TC	0.9	0.8
T X S X TV X E X TC	1.9	1.0

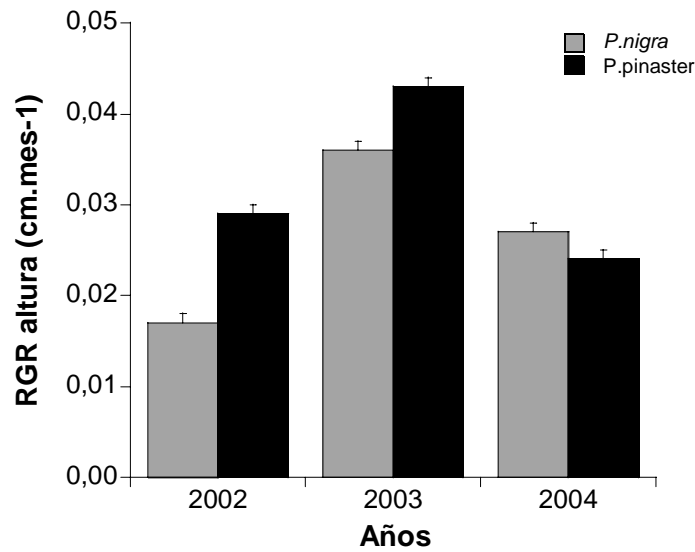


Figura 7 Media + ES del RGR en altura de las plántulas de (*P. nigra* y *P. pinaster*) en el tiempo (2002, 2003 y 2004).

A lo largo del tiempo, también encontramos un efecto de los tratamientos previos de vivero sobre el crecimiento en altura. Tal y como se muestra en la Figura 8, el RGR en altura es mayor el segundo año, en comparación con los otros años, en todos los tratamientos previos de vivero. Asimismo, durante el primer año de establecimiento, el crecimiento en altura fue mucho mayor en las plántulas del tratamiento Control que en los tratamientos T y T+CO₂, mientras que en los dos últimos años el crecimiento en altura fue bastante similar entre los diferentes tratamientos (Figura 8).

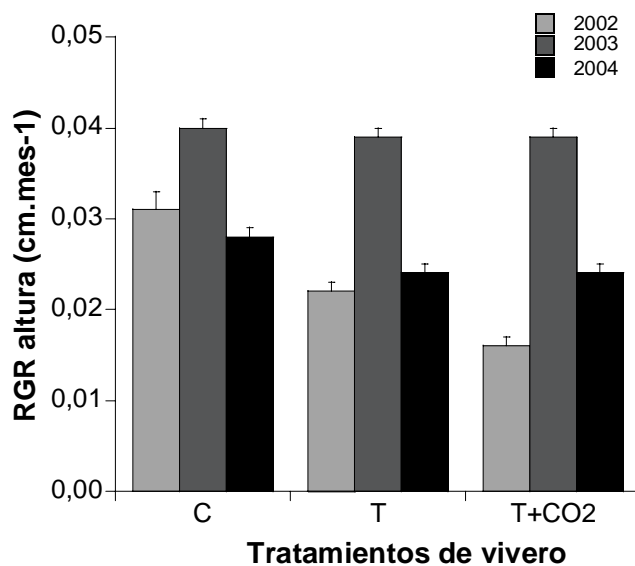


Figura 8 Media + ES del RGR en altura de las plántulas en el tiempo (2002, 2003 y 2004) y en los diferentes tratamientos previos de vivero (C, T y T+CO₂).

Los diferentes tratamientos de campo aplicados modificaron significativamente el RGR en altura y diámetro de las plántulas de manera diferente en los tres años transcurridos del experimento (Tabla 4). En el primer año de establecimiento y durante el año siguiente, las plántulas del tratamiento tubo mostraron un mayor crecimiento en altura, en comparación con las plántulas del tratamiento control y fango (Figura 9A), mientras que el tercer y último año del experimento, las plántulas de los diferentes tratamientos de campo presentaron un RGR en altura similar.

Respecto al diámetro, las plántulas mostraron el mayor RGR en diámetro el primer año de establecimiento, siendo este mayor en el tratamiento fango, en comparación con los dos otros años. Durante el segundo y el tercer año las plántulas C y F mostraron un RGR en diámetro similar, en comparación con las plántulas del tratamiento tubo que crecieron más en 2004 que en 2003 (Figura 9B).

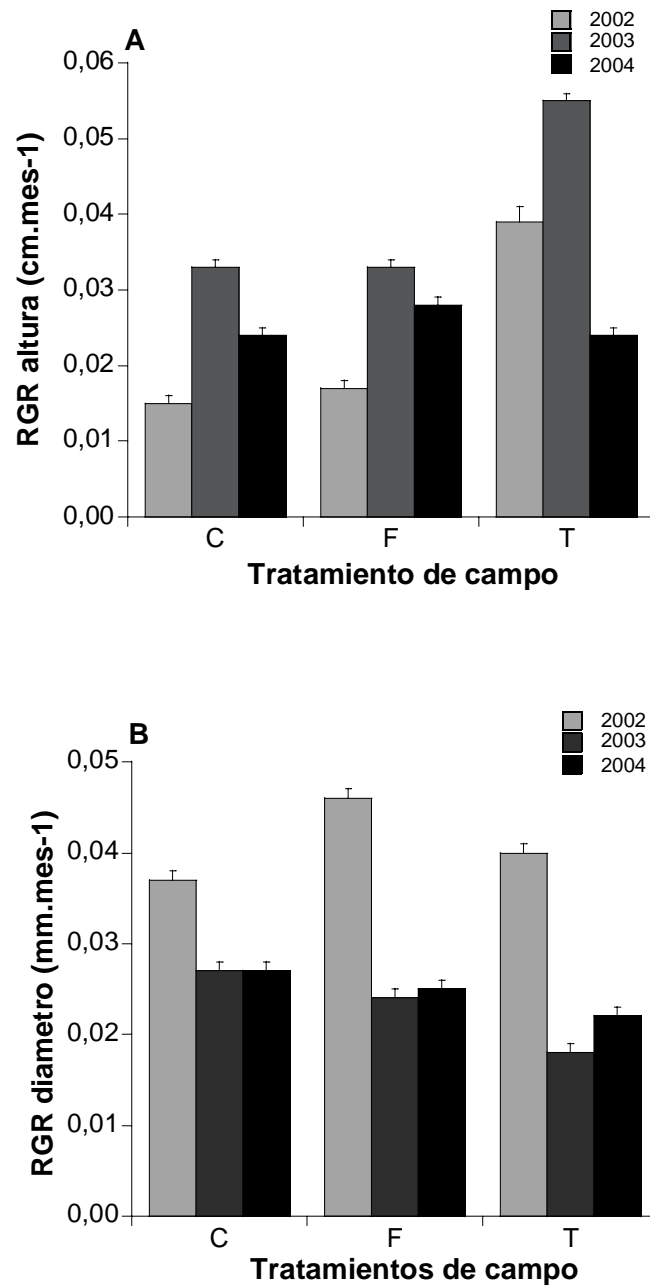


Figura 9 Media + ES del RGR en altura (A), y RGR en diámetro (B) de las plántulas en el tiempo (2002, 2003 y 2004) y en los diferentes tratamientos de campo (C, T y F).

Discusión

La supervivencia final de las plántulas durante los tres años del experimento en campo puede ser considerada alta (más del 65% en casi todos los tratamientos aplicados), en comparación con los resultados obtenidos, 51% en Biel et al. (2004) y 50% en Espelta et al. (2003), en repoblaciones con *P. nigra* en zonas vecinas a nuestra área de estudio. En este sentido, se pueden considerar acertados para el establecimiento inicial de *P. nigra* y *P. pinaster*, casi todos los métodos de la repoblación forestal ensayados en este estudio, del tratamiento combinación de tubo protector y adición de fango térmico (Figura 3).

Las plántulas que únicamente recibieron el fango térmico, son las que mostraron la mayor supervivencia, posiblemente en relación con el incremento aportado del nitrógeno total al suelo (véase el capítulo 3). En este experimento, se ha aplicado la misma dosis de fango térmico que en el capítulo 3, lo que pudo haber aumentado el porcentaje de nitrógeno, favoreciendo de esta manera una mejor tolerancia a la sequía (Jacobs et al. 2004, Jacobs et al. 2005). Otros resultados, en contraste, sugieren una respuesta más lenta en cuanto al establecimiento de las plántulas con la aplicación directa del fertilizante en campo (Arnott y Burdett 1988). En el otro extremo del gradiente de supervivencia entre los tratamientos experimentales ensayados, las plántulas del tratamiento con tubo y con fango presentaron la peor supervivencia, con un 43% de mortalidad, posiblemente debido a la acumulación y la concentración del fango térmico dentro del tubo, tocando continuamente la planta. A pesar de que la dosis aplicada fuera moderada, este continuo contacto pudo haber provocado la asfixia de la planta por falta de O₂, debido posiblemente al aumento del nivel de salinidad o de contaminantes (Egiarte et al. 2005). En el caso de las plántulas solo sometidas a fango en superficie, es probable considerar que el viento y la lluvia provocarían una mayor volatilización y una menor concentración junto a la planta.

La supervivencia de las plántulas se vio perjudicada con respecto a algunos de los tratamientos previos de vivero (T y T+CO₂). Esta peor supervivencia es seguramente debida al incremento en el área y la biomasa foliar en vivero de las plántulas del tratamiento T y T+CO₂ (véase el capítulo 2), lo que implica más transpiración y evaporación en campo (Norby et al. 1999, Jacobs et al. 2004), disminuyendo su capacidad a superar el estrés hídrico, en comparación con las plántulas control que tenían una menor biomasa foliar. Nuevamente, nuestros resultados de supervivencia contrastan con los obtenidos por Biel et al. (2004), en los que la aplicación previa de diferentes niveles de abonado carbónico (CO₂) en vivero no tenía ningún efecto sobre la supervivencia de las plántulas de *P. nigra* en campo. Esta discrepancia podría deberse al diferente tamaño de las plántulas de este tratamiento de vivero en el momento de plantarlas, visto que nuestras plántulas tenían más biomasa foliar y más biomasa total en comparación con las plántulas de Biel et al.

(2004). En todos los tratamientos, la supervivencia se vio más afectada durante el segundo año del experimento, probablemente debido a la sequía ocurrida durante el verano de 2003, en el que las precipitaciones fueron muy inferiores en comparación con los otros años (2002: 136.6 mm, 2003: 87.6 mm y 2004: 108.6 mm según los datos del observatorio de Pinòs (Solsonès) a 8 km de la zona de estudio).

El tratamiento de protección y de adición de fango tuvo un efecto contradictorio sobre la supervivencia y el crecimiento en altura del material vegetal. Mientras las plántulas sometidas al fango térmico F mostraban una mayor supervivencia en comparación con las plántulas de los tratamientos C y T, estas últimas plántulas mostraban un mayor crecimiento en altura. La utilización de los tubos no afectó a la supervivencia (ver también: Oliet et al. 2005), pero sí decididamente al crecimiento en altura de las plántulas durante el experimento, lo que puede atribuirse a: i) una mayor protección frente al viento, el cual a causa del movimiento, genera abrasión y/o desecamiento favoreciendo reducciones en el crecimiento (Savé et al. 1994), y ii) la falta de luz que incita las plántulas a crecer más en altura (Potter 1991, Oliet et al. 2005). El crecimiento en altura fue significativamente mayor en la exposición NE, donde las plántulas recibían una menor insolación, y en consecuencia una menor demanda evaporativa y menos déficit hídrico (ver resultado similar en Verzino et al. 2004). Respecto a los tratamientos previos de vivero, el primer año de establecimiento, las plántulas que habían recibido los tratamientos de T y T+CO₂ mostraron un menor crecimiento en altura, en comparación con las plántulas control, posiblemente debido a la mayor acumulación de reservas durante la fase de vivero en estas últimas. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Biel et al. (2004), que no observaron efectos significativos en el crecimiento de las plántulas en campo después de recibir CO₂ previamente en vivero. Cabe destacar también que la prueba de la capacidad de producción de nuevas raíces en la fase vivero, considerada como un indicador para detectar el posterior vigor de la planta, no se ha visto correlacionada con su buen funcionamiento en campo: puesto que las plántulas de pino de los tratamientos de T y T+CO₂ que eran las que presentaban un mayor aumento de la biomasa y longitud de las raíces en vivero (capítulo 2), no mostraron una mayor supervivencia o crecimiento en el campo, contrariamente a los resultados obtenidos por otros autores (Tinus 1996, Simpson y Ritchie 1997).

La restauración de zonas afectadas por grandes incendios promueve la necesidad de obtener un material vegetal de buena calidad y de mayor resistencia, para su implantación en el monte (Villar-Salvador et al. 2004), visto el coste, el tiempo y el esfuerzo que representan los proyectos de repoblación (Clewel y Rieger 1997, Espelta et al. 2003). En este sentido, los resultados de este trabajo permiten proponer algunas recomendaciones, respecto a la utilización de diferentes métodos de mejora tanto en vivero como en campo para *P. nigra* y *P. pinaster* de tipo general y

específicamente dirigidos a la restauración de zonas afectadas por grandes incendios en la Cataluña Central. Tanto *P. pinaster* como *P. nigra* parecen ser dos especies prometedoras para repoblaciones en la zona del Bages: durante las primeras fases de establecimiento *P. nigra* crece más en diámetro y *P. pinaster* más en altura, alcanzando las dos especies un similar crecimiento a partir del tercer año. En cuanto a los tratamientos previos de vivero, las plántulas del tratamiento T+CO₂, muestran una disminución de la supervivencia de casi el 15% durante el primer año después de su implantación, aunque posteriormente estas plántulas presentan el mismo crecimiento que las plántulas control. Estos resultados sugieren la falta de éxito del uso de tratamientos de vivero que incorporen T+CO₂ para la producción de plantas a utilizar en programas de repoblación de zonas afectadas por grandes incendios en climas de tipo seco-subhúmedo. Por lo que respecta a los tratamientos aplicados en campo, se recomienda el uso del fango térmico aplicado en superficie, puesto que se llegó a aumentar hasta un 6% el porcentaje de supervivencia en este tratamiento, con un bajo coste económico tanto de producción como de aplicación de este producto. En el caso de tubos protectores, puede recomendarse su uso pero en ningún caso en combinación con el fango térmico. El uso de tubos protectores no afectó a la supervivencia, pero sí que se observó un aumento de casi el 50% en el crecimiento en altura de las plántulas, en comparación con las controles, lo que puede resultar interesante para limitar la competencia con otras especies herbáceas.

Bibliografía

Adesodun JK, Davidson DA, Hopkins DW (2005) Micromorphological evidence for changes in soil faunal activity following application of sewage sludge and biocide. *Applied Soil Ecology* 29:39-45

Arnott JT, Burdett AN (1988) Early growth of planted western hemlock in relation to stock type and controlled-release fertilizer application. *Canadian Journal Forest Research* 18:710-717

Barberá GG, Martínez FF, Álvarez RJ, Albaladejo J, Castillo V (2005) Short and intermediate-term effects of site and plant preparation techniques on reforestation of a Mediterranean semiarid ecosystem with *Pinus halepensis* Mill. *New Forest* 29:177-198

Biel C, Savé R, Habrouk A, Espelta JM, Retana J (2004) Effects of restricted watering and CO₂ enrichment in the morphology and transplant performance of nursery grown *Pinus nigra* seedlings. *HortScience* 39:1-6

Black HC (1992) Silvicultural approaches to animal damage management in Pacific Northwest Forests. USDA Forest Service General Technical Report PNW-GTR-287. Portland, Oregon

Clewell A, Rieger JP (1997) What restorationists need from restoration ecologists. *Restoration Ecology* 5:350-354

Cuevas G, Calvo R, Martínez F, Iglesias T, Walter I (2001) Influencia de la aplicación de residuos orgánicos urbanos en la evolución de la cubierta vegetal de un suelo degradado. En: III Congreso Forestal Español. Granada. Tomo IV:254-259

Egiarte G, Camps MA, Alonso A, Ruíz-Romera E, Pinto M (2005) Effect of repeated applications of sewage sludge on the fate of N in soils under Monterey pine stands. *Forest ecology and Management* 216:257-269

Espelta JM, Rodrigo A, Habrouk A, Meghelli N, Ordoñez JL, Retana J (2002) Land changes, natural regeneration patterns and restoration practices after a large wildfire in NE Spain: Challenges for fire ecology and landscape restoration. *Fire and Biological Processes*: 315-324

Espelta JM, Retana J, Habrouk A (2003) An economic and ecological multi-criteria evaluation of restoration methods to recover burned *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Forest Ecology and Management* 180:185-198

Fons J, Vallejo VR (2000) Estrategia nutricional de *Rosmarinus officinalis* y *Genita scorpius* en campos abandonados. En: Simposio de la AEET: Aspectos funcionales de los ecosistemas Mediterráneos. Granada

Gracia CA, Burriel JA, Ibañez JJ, Mata T, Vayreda J (2000) Inventari ecològic i forestal de Catalunya. Regió forestal IV. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, Barcelona 108p.

Habrouk A, Retana J, Espelta JM (1999) Role of heat tolerance and cone protection of seeds in the response of three pine species of wildfires. *Plant Ecology* 145:91-99

Jacobs DF, Rose R, Haase DL, Alzugaray PO (2004) Fertilization at planting impairs root system development and drought avoidance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. *Annals Forest Science* 61:643-651

Jacobs DF, Salifu KF, Seifert JR (2005) Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. *New Forests* 30:235-251

Norby RJ, Wullschlegel SD, Gunderson CA, Johnson DW, Ceulemans R (1999) Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest. *Plant, Cell and Environment* 22:683-714

- Oliet J, Planelles R, Artero F, Jacobs DF (2005) Nursery fertilization and tree shelters affect long-term field response of *Acacia salicina* Lindl. planted in Mediterranean semiarid conditions. *Forest ecology and Management* 215:339-351
- Ordoñez JL (2004) Análisis y modelización del reclutamiento de *Pinus nigra* en zonas afectadas por grandes incendios. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona
- Pausas JG, Vallejo R (1999) The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In: Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin, Chuvieco, E. (ed.), Springer Verlag, Berlin 3-16
- Pausas JG, Ribeiro E, Vallejo R (2004) Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management* 203:251-259
- Potter MJ (1991) Tree shelters. Forestry Commission HandBook 7. HMSO Publication Center, London England: 48
- Quevedo L (2005) Rebrotada postincendi d'espècies llenyoses acompanyants i efecte del foc sobre la seva presència en zones mediterrànies de Catalunya. Treball de recerca del Programa de Doctorat en Biologia, Universitat Autònoma de Barcelona
- Querejeta JI, Roldan A, Albaladejo J, Castillo V (2001) Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *Forest ecology and Management* 149:115-128
- Retana J, Espelta JM, Habrouk A, Ordoñez JL, Solà-Morales F (2002) Regeneration patterns of three Mediterranean pines and forest changes after a large wildfire in northeastern Spain. *Ecoscience* 9:89-97
- Robinson MB, Polglase PJ, Weston CJ (2002) Loss of mass and nitrogen from biosolids applied to a pine plantation. *Australian Journal of Soil Research* 40:1027-1039
- Sabaté S, Gracia CA (1994) Canopy nutrient content of a *Quercus ilex* L. Forest-Fertilization and Irrigation effects. *Forest Ecology and Management* 68:31-37
- Savé R, Pons J, Massons J, Biel C (1994) Citrus Growth and leaf gas exchange response to seismic and wind stress. In: Estudio de los efectos de un nuevo tipo de protector de tronco de la empresa ACUDAM, en plantas sometidas a diferentes estreses ambientales, Cabrils, Barcelona Feb 1996

Simpson DA, Ritchie GA (1997) Does RGP predict field performance? A debate. *New Forest* 13:253-277

Smith HC (1993) Development of res oak seedlings using plastic shelters on hardwood sites in West Virginia. USDA Forest Service Research Paper NE-672. Randnor, Pennsylvania

Sort X, Alcañiz JM (1999) Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation and Development* 10:3-12

South D, Mexal JG (1984) Growing the best seedling for reforestation success. *Forestry Departmental. Series nº 12*. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University

StatView (1999) by SAS Institute Inc

Terradas J (1996) *Ecologia del Foc*. Editions Proa, Barcelona. 63p.

Tinus RW (1996) Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree Physiology* 16:795-799

Trabaud L (1981) Man and Fire: Impacts on Mediterranean vegetation. In: *Mediterranean type shrublands*, di Castri F. , Godall W. and Specht R. L. (Eds). Elsevier Publishers, Amsterdam 523-537

Tuley G (1985) The growth of young oak trees in shelters. *Forestry* 58:181-195

Valdecantos A (2001) Aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la repoblación de zonas forestales degradadas de la Comunidad Valenciana. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante

Verzino G, Joseau J, Diaz M, Dorado M (2004) Comportamiento inicial de especies nativas del Chaco Occidental en plantaciones en zonas de pastizales de altura de las sierras de Córdoba, Argentina. *Bosque* 25:53-67

Villar-Salvador P, Planelles R, Oliet J, González M (1998) Efecto de diferentes niveles de estrés hídrico y de su duración en las relaciones hídricas de plántulas de *Quercus ilex*. In *Proc. 4th Symposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*, Spanish Soc. of Plant Physiol. Murcia, Spain 65-68

Villar-Salvador P, Planelles R, Enríquez E, Peñuelas Rubira JL (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

Capítulo 5

Discusión general

Discusión general

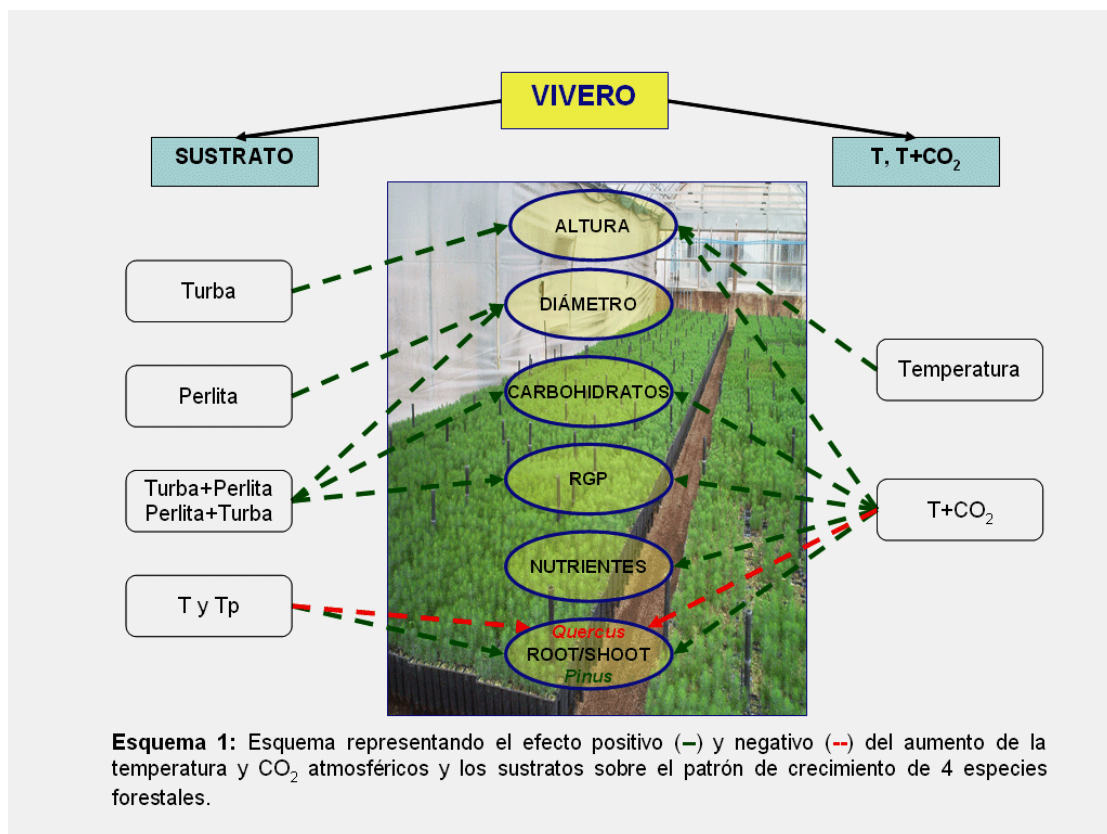
Un proyecto de restauración forestal significa un proceso continuado de toma de decisiones, que comprende resolver múltiples cuestiones simultáneas, como por ejemplo: ¿Qué especies se deben utilizar?, ¿Qué tratamientos podemos realizar en vivero para aumentar la calidad del material vegetal? ¿Es útil aplicar fertilizantes en campo en el momento de la plantación? ¿Puede ser el empleo de bio-sólidos (fangos de depuradora) una buena práctica para la mejora de las características de los suelos a reforestar? A lo largo del presente trabajo se ha intentado responder a parte de estas preguntas en el contexto de algunas de las principales especies arbóreas mediterráneas utilizadas en programas de restauración y especialmente en el marco de la reforestación de zonas afectadas por grandes incendios. En este capítulo se discuten de manera general los resultados obtenidos, tratando de integrar la diversa información de esta memoria, e intentando establecer recomendaciones para la producción en vivero y utilización en campo de las especies estudiadas. A su vez se comparan los resultados obtenidos en este estudio con las prácticas habituales realizadas por parte de viveros comerciales dedicados a la producción de plantas de especies arbóreas para reforestación.

1- Optimización de las técnicas de producción viverística

1.1.- Manejo del sustrato

Dentro del proceso de producción de plántulas de especies forestales arbóreas en vivero, el primer elemento potencialmente a modificar, para aumentar la calidad del material vegetal producido, es el tipo de sustrato en el que las plantas se desarrollan (Pastor et al. 2002, Savé et al. 2002). Fundamentalmente, el sustrato debe garantizar el anclaje y soporte de la planta, permitir la aireación de las raíces y almacenar y suministrar el agua y nutrientes necesarios para el desarrollo. Normalmente estos sustratos están constituidos por mezclas de elementos orgánicos e inorgánicos con características complementarias para aumentar la retención de agua y la porosidad (Ansorena 1994). En este sentido, los resultados de nuestro experimento con diferentes combinaciones de turba y perlita (Capítulo 1) han mostrado un importante impacto en el crecimiento, morfología, acumulación de carbohidratos en las plántulas y potencial desarrollo de nuevas raíces (Esquema 1), con una interesante consecuencia: la posibilidad de desarrollar diferentes tipologías de plantas destinadas a diferentes escenarios de repoblación. Esta diversidad de efectos de las diferentes combinaciones de sustratos ensayadas ha sido mayor sobre las especies de *Quercus* en comparación con los *Pinus*. En todas las especies el uso de sustratos con perlita (menor capacidad de retención de agua) favorece el desarrollo de plántulas con un mayor crecimiento en diámetro y un mayor contenido de almidón en el sistema radicular, ambas

características potencialmente más idóneas para su instalación en ambientes más desfavorecidos (Burdett 1990, Puttonen 1997). Sin embargo, mientras que este efecto se ha visto también acompañado en el caso de *Q. ilex* y *Q. humilis* por una mayor asignación de biomasa al sistema radicular (mayor root/shoot) en las plántulas crecidas en estas condiciones, el tipo de sustrato escogido apenas afecta al patrón de asignación de biomasa en el caso de *P. nigra* y *P. pinaster*. Las plántulas de todas las especies crecidas en estas condiciones muestran un menor potencial (retraso) en el desarrollo radicular (RGP), una característica cuyo potencial efecto en el proceso de establecimiento y persistencia después de la plantación debería ser analizado en el futuro. A diferencia del efecto de la perlita, una mayor proporción de turba estimula en las plántulas de las cuatro especies el crecimiento en altura, obteniéndose ejemplares con un porte mayor, una menor cantidad de reservas en el sistema radical, pero un mayor potencial de desarrollo de nuevas raíces (rapidez de arraigo), características quizás más indicadas para aplicaciones de revegetación en condiciones menos desfavorables. El evidente efecto que la modificación del tipo de sustrato puede tener en el desarrollo de las plántulas y en su pre-adaptación a diferentes tipos de ambientes, especialmente en el caso de los dos *Quercus* analizados, sugiere que los viveros comerciales dedicados a la producción de planta forestal deberían aprovechar estos resultados y tener en cuenta la importancia de las diferentes mezclas de sustratos para la obtención de una planta de buena calidad y con un mayor sistema radical, especialmente para las repoblaciones en zonas desfavorables.



1.1.- Modificación de las condiciones ambientales del vivero: Tratamientos de temperatura y abonado carbónico

La aplicación de un aumento en la temperatura ambiental y el enriquecimiento del aire del invernadero con CO₂ son prácticas empleadas en las instalaciones donde se realiza una producción hortícola intensiva. En el caso de los viveros forestales, su aplicación podría ser rentable en el caso de especies de crecimiento lento donde un aumento en la tasa de crecimiento redujera el tiempo de producción, en momentos de una elevada demanda de material vegetal (Clewell y Rieger 1997), o bien en aquellos caso en los que la aplicación de estas técnicas generaran atributos morfológicos o fisiológicos interesantes para mejorar el establecimiento posterior de las plantas (ej. potencial incremento del root/shoot con una atmósfera enriquecida en CO₂ o acumulación de osmolitos que reduzcan el estrés hídrico en Savé et al. 1998). Diferentes estudios han mostrado efectos positivos del enriquecimiento con CO₂ en el desarrollo de plántulas de pinos, roble, olivo, madroño, durillo y laurel (Biel et al. 2003, 2004, Cortés et al. 2004, Pardo et al. 2003, Savé et al. 1998) y negativos en el caso de la germinación y primeras etapas del desarrollo en la encina (Cortés et al. 2004). Nuestros resultados confirman este importante estímulo del crecimiento en todas las especies estudiadas al aumentar la temperatura y el CO₂ atmosférico, a la vez que aportan nuevos datos sobre el efecto que estos tratamientos tienen en otros aspectos de la fisiología y morfología de las plantas. Así, hemos observado como en el tratamiento de temperatura y CO₂ aumentaba en las plantas el contenido en N en las raíces, la concentración de carbohidratos y la capacidad posterior de producir nuevas raíces (Esquema 1). Sin embargo cabe destacar también el diferente impacto de este tratamiento en el modelo de asignación de las plantas, manteniéndose el root/shoot tanto en *P. nigra* como en *P. pinaster* y disminuyendo en *Q. ilex* y *Q. humilis*.

Una interpretación global de los resultados obtenidos sugieren en el caso de los pinos que este tratamiento podría ser una buena herramienta para aumentar la productividad viverística, consiguiendo a la vez un material vegetal de mayor porte, con más reservas y potencial desarrollo radicular, pero con un modelo de asignación de biomasa similar a las plantas control. En el caso de ambos *Quercus* la disminución en la asignación de biomasa a raíces, desaconsejaría en buena parte su uso en aquellas condiciones de plantación que requieren de plantas con una asignación de biomasa equilibrada e incluso en algunos casos una mayor prioridad del sistema radical. Sin embargo, aunque en opinión de los viveristas comerciales consultados (ej AGROMILLORA, Bioriza, Vivers la Fageda) la aplicación de esta técnica es altamente valorada en la producción de olivos y frutales de hueso debido al precio final del producto, las mejoras que permitiría introducir en el cultivo de pinos no son tan apreciadas, al tratarse de especies de rápido desarrollo, elevada

plasticidad y por lo general buena capacidad de superar el estrés post-transplante y con un precio final moderado.

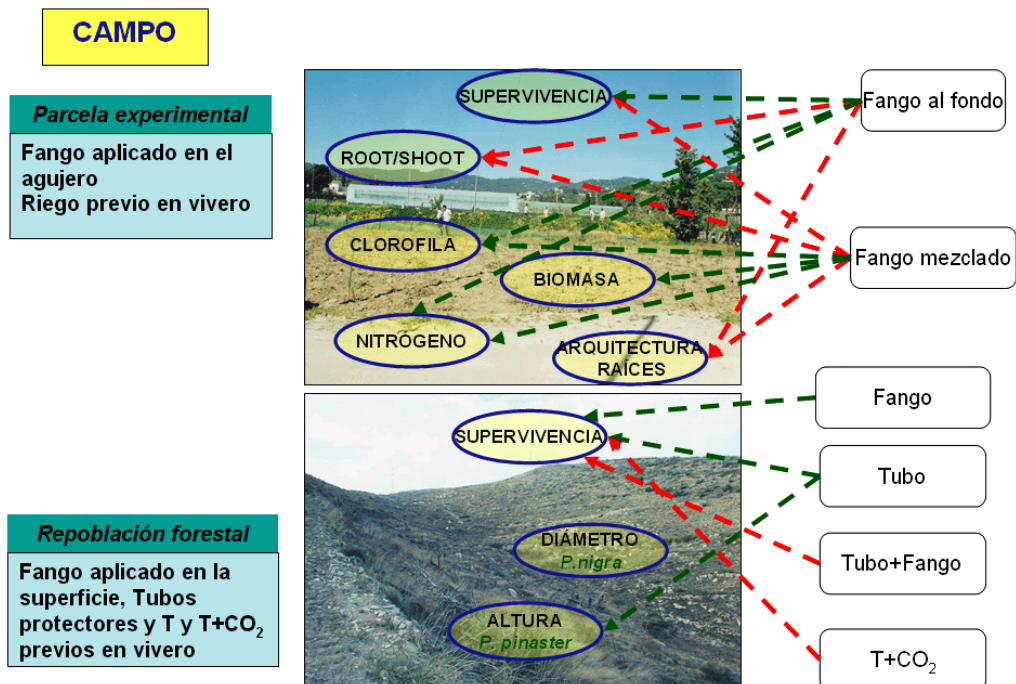
2. Optimización del proceso de establecimiento en campo mediante el empleo de fango térmico de depuradora y sistemas de protección: interacción con los tratamientos previos de vivero

El éxito en el establecimiento en campo de las plántulas utilizadas en el proceso de repoblación depende de múltiples factores, entre los que destacan en orden de importancia las condiciones ambientales (meteorológicas y edáficas), el manejo de la planta, y la morfología y fisiología del material vegetal según South (2000). En los últimos años diferentes estudios han demostrado como la utilización de bio-sólidos (ej. fangos de depuradora) puede, por su elevado contenido en materia orgánica, mejorar las características físicas del suelo, favoreciendo de esta manera la capacidad de retención de agua (Düring y Gäth 2002, Adesodun et al. 2005) e incrementando su fertilidad gracias al aporte de nutrientes como N, P, K y micro nutrientes esenciales (Düring y Gäth 2002, Robinson et al. 2002, Valdecantos et al. 1996). Estas mejoras pueden facilitar el desarrollo de la vegetación natural o introducida después de un proceso de reforestación (Navas et al. 1999, Tarrasón 2004). Sin embargo, en contraste con la abundante información sobre la aplicación de fango concentrado, los fangos en estado de compost o secados térmicamente son materiales relativamente nuevos, y existen pocas experiencias sobre sus efectos en aplicaciones de campo (Naoum 1998, Ojeda et al. 2003). En este contexto, nuestros experimentos, desarrollados, en condiciones de parcela experimental (capítulo 3) y en condiciones de campo (capítulo 4) aportan diferentes resultados sobre su efecto en la supervivencia y desarrollo de la plantas, permitiendo establecer algunas recomendaciones en cuanto a la utilización del fango térmico, respecto al tipo de aplicación (mezclado o en profundidad, capítulo 3) o su combinación con otros tratamientos (ej. tubos protectores, capítulo 4).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la parcela experimental (capítulo 3), se constata un efecto positivo de la aplicación del fango térmico sobre el suelo, con un aumento del porcentaje de nitrógeno, si bien no se produjeron cambios en otros importantes parámetros edáficos (ej. materia orgánica, salinidad, textura) probablemente por el tipo de suelo (ex. agrícola) sobre el que se realizó el ensayo. Esta mejora de las condiciones nutricionales del suelo parece ser la causa más plausible del aumento observado del contenido en clorofila en las plantas (capítulo 3) y de su mayor supervivencia y capacidad de crecimiento al recibir el aporte de fango (Coppinet y Juste 1987, Robinson et al. 2002), tanto en condiciones experimentales como en condiciones de campo (capítulos 3 y 4). Sin embargo, ambos experimentos han destacado también la posibilidad de un

impacto negativo sobre la supervivencia de las plantas según el tipo de aplicación del fango o bien de su combinación con otros tratamientos (Esquema 2). Así, cuando el fango es mezclado con la tierra del hoyo de plantación la supervivencia disminuye en un 11% mientras que al combinar la aportación de fango en superficie con el uso de tubos protectores esta llega a descender hasta un 43%. En ambos casos, estos resultados sugieren un efecto negativo cuando la aplicación del fango térmico se realiza en condiciones de íntimo contacto entre éste y el material vegetal (con el sistema radicular en el experimento del capítulo 3 y con la base del tallo en el interior de los tubos protectores en el capítulo 4) debido quizás a un aumento local de la salinidad o a la liberación de contaminantes (Egiarte et al. 2005).

Respecto al efecto de los tratamientos previos recibidos en vivero (diferente riego en el capítulo 3 y aumento de la temperatura y CO₂ en el capítulo 4) estos tuvieron diferentes consecuencias sobre la supervivencia y crecimiento de las plántulas, aunque en ningún caso interaccionaron con los tratamientos de aporte de fango térmico. La reducción del riego aplicada en el capítulo 3 no tuvo consecuencias sobre la posterior supervivencia y crecimiento de las plántulas en la parcela experimental, indicando la posibilidad de aplicar un uso del agua más restrictivo en la producción de estas plantas en vivero. En cambio, el uso de un aumento de la temperatura y una atmósfera enriquecida en CO₂, produjo plantas con características a priori interesantes para su posterior establecimiento en el campo (ej. mayor contenido de N y concentración de carbohidratos raíces, mayor capacidad de producir nuevas raíces), pero estas mostraron una menor supervivencia (15%) y similar crecimiento a las controles una vez establecidas. Estos resultados permiten una doble interpretación. Por un lado esta menor supervivencia, probablemente relacionada con la mayor biomasa y superficie foliar de estas plantas en condiciones desfavorables, sugiere la falta de éxito del uso de estos tratamientos de vivero para la producción de plantas a utilizar en programas de repoblación de zonas afectadas por grandes incendios en climas de tipo seco-subhúmedo, a no ser que se incorporen medidas que minimicen el estrés post-transplante (ej hidrotentores). Sin embargo cabe destacar que la supervivencia registrada en este tratamiento ($67.1 \pm 3.5\%$), aunque inferior a los otros tratamientos, es superior a la conseguida en otros experimentos de reforestación en zonas cercanas al área de estudio (de 50 a 51% en Espelta et al. 2003, Biel et al. 2004). En este sentido, el hecho de que la supervivencia solo disminuya en un 15% respecto a los otros tratamientos, pero estas plantas conserven tasas de crecimiento similares al control y mantengan su mayor porte adquirido en vivero (ver capítulo 2) obliga a preguntarse hasta que punto este mayor desarrollo puede acelerar positivamente la recuperación de algunos atributos (ej. recubrimiento) de la zona a restaurar.



Esquema 2: Esquema representando el efecto positivo (→) y negativo (↔) del fango térmico y de los tubos protectores sobre el patrón de crecimiento de 4 especies forestales.

Bibliografía

- Adesodun JK, Davidson DA, Hopkins DW (2005) Micromorphological evidence for changes in soil faunal activity following application of sewage sludge and biocide. *Applied Soil Ecology* 29:39-45
- Ansorena J (1994) Sustratos. Propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 172p.
- Biel C, de Herralde F, Savé R, Pardo A, Espelta JM, Meghelli N (2003) Estudio del efecto del enriquecimiento del aire con dióxido de carbono en el crecimiento de especies leñosas. VII Congreso Nacional de la Asociación Española de Ecología Terrestre. Barcelona
- Biel C, Savé R, Habrouk A, Espelta JM, Retana J (2004) Effects of restricted watering and CO₂ enrichment in the morphology and transplant performance of nursery grown *Pinus nigra* seedlings. *HortScience* 39:1-6
- Burdett AN (1990) Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal Forest Research* 20:415-427

Clewell A, Rieger JP (1997) What restorationists need from restoration ecologists. *Restoration Ecology* 5:350-354

Coppenet M, Juste C (1987) Oligoelementos indispensables para la vida de las plantas. Fenómeno de toxicidad. En: *Edafología. 2. Constituyentes y propiedades del suelo*. Bonneau M. y Souchier B, Masson, S. A.410-418

Cortes P, Espelta JM, Savé R, Biel C (2004) Effects of nursery CO₂ enriched atmosphere in the germination and seedling morphology of two Mediterranean oaks with contrasting leaf habit. *New Forests* 28:79-88

Düring RA, Gäth S (2002) Utilization of municipal wastes in agriculture: where do we stand, where will go? *Journal Plant Nutrition Soil Science* 165:544-556

Egiarte G, Camps MA, Alonso A, Ruíz-Romera E, Pinto M (2005) Effect of repeated applications of sewage sludge on the fate of N in soils under Monterey pine stands. *Forest ecology and Management* 216:257-269

Espelta JM, Retana J, Habrouk A (2003) An economic and ecological multi-criteria evaluation of restoration methods to recover burned *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Forest Ecology and Management* 180:185-198

Naoum C, Zorpas A, Savvides C, Haralambous KJ, Loizidou M (1998) Effects of thermal and acid treatment on the distribution of heavy metals in sewage sludge. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 33:1741-1751

Navas A, Machín J, Navas B (1999) Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). *Bioresource Technology* 69:199-205

Ojeda G, Alcañiz JM, Ortiz O (2003) Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation and Development* 14:563-573

Pardo A, Savé R, Azcón-Bieto J, Casadesús J, Biel C (2003) Intercambio de gases a nivel de individuo y producción de biomasa bajo CO₂ elevado en especies de crecimiento lento. XV Reunión Nacional de la Sociedad Española de Fisiología Vegetal y VIII Congreso Hispano-Luso de Fisiología Vegetal. Palma de Mallorca

Pastor JN, Marfà O, Savé R (2002) Adaptación al transplante del *Viburnum tinus* L. cultivado en contenedor. Valoración de la eficiencia hídrica. Proc. I Jornadas Ibericas de Plantas Ornamentales. Sevilla.313-323

Puttonen P (1997) Looking for the "silver-bullet" – can one test do it? *New Forest* 13:9-27

Robinson MB, Polglase PJ, Weston CJ (2002) Loss of mass and nitrogen from biosolids applied to

Savé R, De Herralde F, Retana J, Espelta JM, Biel C (1998) Effect of elevated CO₂ on plant productivity and herdening under Mediterranean conditions. Proc. The Earth's changing land GCTE-LUCC Open Science Conference on Global Change. Barcelona, Spain.

Savé R, Biel C, De Herralde F, Retana J, Espelta JM (2002) Optimización de la producción viverística y de la restauración ecológica de zonas degradadas. *Riegos y Drenajes* 123:54-57

South D (2000) Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. *Forestry and wildlife Research Series N° 1*. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University, Alabama. 12pp.

Tarrasón D (2004) Alternatives de fertilizació per a la rehabilitació de sòls degradats: aplicació de fang fresc, compostat i d'assecatge tèrmic. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona

Valdecantos A, Vilagrosa A, Seva JP, Cortina J, Vallejo VR, Bellot J (1996) Mycorrhization et application de compost urbain pour l'amélioration de la survie et de la croissance des semis de *Pinus halepensis* en milieu semi-aride. to *Options Méditerranéennes* . Ref Type: Internet Communication

Conclusiones generales

1. Optimización de la producción viverística: Manejo del sustrato, modificación de la temperatura mínima y de la concentración de CO₂ atmosférico

1. La retención de agua y los valores de agua fácilmente disponible fueron mayores en los sustratos que contenían turba, mientras que los mayores valores de capacidad de aireación se obtienen cuando aumenta la presencia de perlita.
2. El crecimiento en diámetro fue superior en el sustrato perlita y en sus dos combinaciones (Tp y Pt) mientras que la interacción entre el sustrato utilizado y la especie indicó un crecimiento en altura similar en todos los sustratos en *P. pinaster*, un mayor crecimiento en turba en *P. nigra* y *Q. humilis*, y un mayor y similar crecimiento en turba y en la combinación turba-perlita en *Q. ilex*.
3. Las plántulas que crecieron en los sustratos con una mayor proporción de perlita (una menor cantidad de agua disponible) mostraron una mayor asignación de biomasa a raíces y una menor asignación a hojas. Sin embargo, al tener en cuenta el balance entre biomasa subterránea y aérea (R/S), la interacción entre sustrato y especie mostró que, mientras que en *P. nigra* y *P. pinaster* el R/S fue similar en todos los sustratos, en las frondosas (*Q. ilex* y *Q. humilis*) el R/S fue superior en los sustratos con mayor cantidad de perlita (P y Pt).
4. En *P. nigra*, el potencial de crecimiento de nuevas raíces fue mayor en las plántulas procedentes de sustratos en los que abundaba la perlita (P y Pt), mientras que en *P. pinaster*, *Q. ilex*, y *Q. humilis* era mayor en los sustratos con más turba.
5. El contenido en almidón fue mayor en los sustratos en los que dominaba la presencia de perlita (P y Pt), disminuyendo en aquellos con un mayor contenido en turba. Respecto al contenido de azúcares solubles, el contenido era mayor en los sustratos con mayor disponibilidad hídrica (T y Tp) en las dos especies de pinos y en las condiciones con menor disponibilidad hídrica (P) en *Q. ilex* y *Q. humilis*.
6. En *P. nigra* y *P. pinaster* no existieron diferencias en el contenido de almidón entre las raíces iniciales y las de nueva formación y se detectó en cambio un mayor porcentaje de azúcares en las raíces nuevas. Las dos frondosas (*Q. ilex* y *Q. humilis*) presentaban un

mayor contenido de almidón en las raíces iniciales y similar presencia de azúcares en ambos tipos de raíces.

7. Con un aumento en la temperatura mínima todas las especies incrementaron su crecimiento, viéndose éste efecto aumentado al complementarlo con una atmósfera enriquecida en CO₂ (T + CO₂).
8. El aumento de temperatura y sobretodo T+CO₂ disminuyeron la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea (R/S) en *Q. ilex* y *Q. humilis*, mientras que las dos especies de pino (*P. pinaster* y *P. nigra*) mostraron un R/S similar en todos los tratamientos aplicados. La disminución en el root/shoot en las dos especies de *Quercus* se debió a un importante aumento de la biomasa de tallos y de hojas (solo en T+CO₂),
9. Entre las cuatro especies estudiadas se observaron diferencias significativas en la eficiencia en el uso del agua (WUE), siendo esta mayor en *P. nigra* y *Q. humilis* en comparación con *P. pinaster* y *Q. ilex*. En todos los casos, las plántulas del tratamiento T+CO₂ mostraron una mayor WUE en comparación con las plántulas de los tratamientos C y T.
10. De los diferentes órganos de la planta (raíz, tallo y hojas), las raíces fueron las que presentaron la concentración significativamente más alta de carbohidratos totales no estructurales (TNC) en las dos especies de *Quercus* (*Q. ilex* y *Q. humilis*), mientras que las dos especies de pino (*P. pinaster* y *P. nigra*), mantenían un porcentaje de TNC igual en los 3 órganos de la planta. La interacción tratamiento x especie indicó que mientras en los dos *Quercus*, el porcentaje de TNC disminuía en el tratamiento T+CO₂ en comparación con C y T, tanto en *P. nigra* como en *P. pinaster* el porcentaje de TNC se mantenía muy similar en los tres tratamientos de vivero.
11. Los tratamientos de T y T+CO₂ favorecieron en todas las especies un aumento en la concentración de N en las raíces y en la capacidad de producción de nuevas raíces (RGP), tanto en número como en longitud.

2. Restauración de zonas mediterráneas afectadas por grandes incendios: Uso del fango térmico

1. La aplicación de fango térmico en la parcela experimental promovió una disminución de pH respecto al suelo control y un aumento del contenido de nitrógeno total.

2. La supervivencia de las plántulas disminuyó en el tratamiento con fango mezclado con el suelo del hoyo de plantación, en comparación con en el tratamiento control, mientras que las plántulas en las que se aplicó el fango en el fondo del hoyo los valores eran intermedios. Con respecto al crecimiento en biomasa, este fue mayor en las plántulas en las que se depositó fango térmico en el fondo del hoyo de plantación con respecto a los dos otros tratamientos.
3. La aplicación de fango térmico en el hoyo de plantación provocó una disminución significativa de la relación entre biomasa subterránea y biomasa aérea de las plántulas en comparación con el tratamiento control.
4. Además de las modificaciones en el patrón de asignación de biomasa, se observó que la arquitectura del sistema radicular era diferente según el tipo de tratamiento de aplicación de fango térmico recibido, así las raíces de los controles se desarrollaron normalmente en todo el volumen de suelo, en el tratamiento de fango mezclado con el suelo las raíces crecieron preferentemente de modo vertical y hacia abajo y en las plántulas en las que se depositó el fango térmico en el fondo del hoyo de plantación las raíces se desarrollaron únicamente de modo lateral.
5. En la repoblación de la zona afectada por un gran incendio en el Bages, el tratamiento aplicado previamente en vivero a las plántulas (C, T y T+CO₂), la aportación de fango térmico (con y sin fango) y el uso de protección (con tubo y sin tubo) modificaron significativamente la supervivencia final de las plántulas de *P. nigra* y *P. pinaster*. La supervivencia de las plántulas que habían recibido una combinación de temperatura con abonado carbónico (T+CO₂) fue menor en comparación con las plántulas del tratamiento de temperatura y el control. Por su parte, la interacción del tratamiento de protección con el tratamiento de fango nos indica que las plántulas que solo recibieron fango (+F) son las que sobrevivieron más, mientras que las que obtuvieron peores resultados fueron las que recibieron el tratamiento de tubo protector y fango (+T, +F).
6. Las plántulas de *P. pinaster* crecieron más que las de *P. nigra*, y más en el tratamientos control (C) que en el de temperatura (T) y T+CO₂, disminuyendo las diferencias en el crecimiento en altura entre especies y con el tratamiento con temperatura y abonado carbónico a partir del segundo año en campo. En cuanto a la aplicación de los diferentes tratamientos de campo, el RGR en altura fue mayor en las plántulas del tratamiento con tubo protector (T), en comparación con los tratamientos control y fango. La aportación de fango no modificó el crecimiento de las plántulas.

Agradecimientos

Muchos años han pasado desde que llegué al CREAF y me parece que fue ayer mismo. Mentiría diciendo que todo fue fácil para mí, la tesis me pareció interminable y como que no se quería acabar nunca. Más de una vez quise dejarlo todo por diferentes razones, tanto personales como profesionales, pero afortunadamente para mí, muchas son las personas que me han animado y ayudado de cerca o de lejos a llevar este trabajo a cabo y aguantar hasta el final.

A Josep Maria Espelta a Robert Savé mis directores por dirigirme y animarme durante estos años y enseñarme los primeros pasos en la investigación. Además de directores, también fuisteis los revisores de unas cuantas frases. Muchas gracias a los dos.

A Javi Retana por resolver unas cuantas dudas de estadística y por ser presente y animarme cuanto más lo necesitaba

A mi pequeña familia de Argelia por la gran comprensión y paciencia que han mostrado y los ánimos que me han aportado durante todos estos años.

A mi familia de Barcelona (Esmá, Mohammed, Tatiana y Fatéma) por los buenos ratos que hemos pasado juntos durante estos años y por todo el apoyo y el ánimo que me habéis dado.

A Quim mi hermano catalán y mi mejor amigo, siempre dispuesto a ayudar cuando más hace falta. También fuiste el revisor de unas cuantas frases, ahora ya sabes mucho de estrés hídrico, fangos y tubos. Muchas gracias por todo

A Pilar, Isabel, Olga, Lluís y José Luis por ser los mejores amigos que se pueden tener. Sabéis todos lo que os debo y os lo agradezco. La amistad y la ayuda compartida durante este tiempo con vosotros me ha alegrado mi estancia y espero que esta relación dure toda la vida.

A todos los compañeros de despacho (Xavi, Abde, Roberto, Rosa Maria, Belén, Iraima, Roger, José Luis) con quien he compartido momentos inolvidables. Siempre habéis sido una gran familia para mí. Cada uno de vosotros me ha ayudado a su manera tanto a nivel profesional como social y os lo agradezco muchísimo.

A otros compañeros del CREAF: Marta, Maria, Angi, Paula, Imma, Elena, Jordi (s), Anselm Corina, Romá, Gerar, Maria Deu, Ivette, Loles, Xavi, David, Carles, Wilson...etc y la lista es

muy grande. Lo he dicho antes y lo vuelvo a repetir “Si no estas en la lista es porque estas en mi corazón y no en mi memoria ahora”.

A Marc Estiarte por la gran ayuda en laboratorio y el tiempo que me ha dedicado a resolver unas cuantas dudas sobre almidones y azúcares.

A Richard Joffre y su grupo por su ayuda y amabilidad al recibirme en el CEFE (Montpellier) para hacer los análisis de azúcares y almidón con el NIRS.

A Josep M. Alcañiz y su grupo de edafología por los consejos y la gran ayuda en temas de fangos de depuradora y análisis de suelos.

Un especial agradecimiento a Joan, Carles, Marta y Cristina por todo.

A todos los compañeros de IRTA: Carmen, Feli, Xavi, Jaume, Pere, Anna, Toni, Mireia, M^a Carmen, Eulàlia,...por toda la ayuda y la amistad.

A todos los compañeros que me han ayudado en el campo y en el laboratorio (Patricia, Oscar, Sandra, Iraima, Abde, Pilar, Quim, Poto, Lluís, M^a Carmen, Esma) y con quien compartí momentos muy agradables, especialmente Patricia a quien debo unos momentos inolvidables.

Agradecimientos especiales

Para acabar, me gustaría agradecer a la familia Duo Castella por permitirme trabajar y montar los experimentos en sus propiedades (Castelltallat). Además de ofrecernos sus campos también nos abrieron su casa y nos recibieron con mucha amabilidad y simpatía.

A los viveros de AGROMILLORA, por dejarnos utilizar sus viveros durante un tiempo, y por contestar a unas cuantas preguntas sobre el uso del CO₂. Gracias también a los viveros de la Fageda (Garrotxa) y Bioriza (Girona) por recibirnos y contestar a unas cuantas preguntas.

Gracias también a la asociación viverística de Girona y a los Carburos Metálicos.

Este trabajo ha estado realizado gracias a una beca predoctoral de la Asociación Española de Cooperación Internacional (AECI) y gracias a la financiación del proyecto PETRI (Transferencia de metodologías para la optimización de la producción viverística y la restauración de zonas afectadas por grandes incendios).