

EVALUACIÓN A MEDIO PLAZO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN REPOBLACIONES FORESTALES DE *PINUS HALEPENSIS*

David Fuentes Delgado¹, Alejandro Valdecantos Demá^{1,2} y Jordi Cortina i Segarra³

¹ Fundación CEAM. C/ Charles R. Darwin 14. Parque Tecnológico Paterna. 46980-VALENCIA (España)

² Dep. Ecosistemas Agroforestales. E.P.S. Gandía. U.P.V. Ctra. Nazaret-Oliva s/n. 46730-GANDÍA (España)

³ Dept. d'Ecologia e IMEM. Universitat d'Alacant. Ap 99. 03080-ALACANT (España)

Resumen

Dado el delicado balance entre impactos positivos y negativos en la aplicación de biosólidos en trabajos de restauración forestal, la determinación de dosis adecuadas es un aspecto clave para la optimización del uso de estos residuos orgánicos en repoblaciones forestales en ambiente mediterráneo. En este ensayo realizamos una evaluación de la supervivencia y crecimiento de brinzales de *Pinus halepensis* sometidos a diferentes dosis de lodos de depuradora compostados o secos al aire, durante los tres años posteriores a su plantación. Tres años después de la plantación, el porcentaje de mortalidad fue elevado (>50% en el conjunto de todos los brinzales). Las dosis de 15 y 30 Mg.ha⁻¹ apenas modificaron los porcentajes de supervivencia respecto al tratamiento control, mientras que dosis superiores los hicieron disminuir significativamente. Esta mortalidad se relacionó con el valor de la conductividad eléctrica del suelo tras el primer verano, y se mantuvo constante los tres años posteriores en relación al tratamiento control. El índice de efecto relativo aplicado al área basal de los brinzales tratados mostró una influencia muy positiva de las dosis más bajas frente a los valores negativos de dicho índice con las dosis de 60 Mg.ha⁻¹. Nuestros resultados sugieren que la aplicación de dosis inferiores a 30 Mg.ha⁻¹ de lodo de depuradora puede suponer una mejora en el resultado global de repoblaciones de *Pinus halepensis* en medios mediterráneos secos.

Palabras clave: Fertilización, Repoblación, Compost, Lodo, Dosis, *Pinus*

INTRODUCCIÓN

Los lodos o biosólidos son un subproducto originado durante el proceso de depuración de las aguas residuales. Su producción se ha incrementado notablemente durante las últimas décadas debido principalmente al mayor volumen de agua tratada y al incremento de la eficiencia en el proceso de depuración. Como característica general, estos residuos presentan un elevado contenido en materia orgánica y

nutrientes, si bien las propiedades físico-químicas del material final y, por tanto, su potencial utilización como enmienda edáfica dependen de factores tan variables como el origen del agua tratada o el proceso de depuración empleado. La reutilización de los biosólidos es la opción medioambientalmente más recomendable para su gestión (HALL, 1999), en contraste con las vías tradicionales de eliminación de este residuo, como son la incineración y el transporte a vertederos.

Las repoblaciones forestales tradicionales realizadas en ambiente mediterráneo seco y semiárido suelen dar como resultado un bajo porcentaje de supervivencia de los brinzales introducidos, debido normalmente a condiciones meteorológicas o edáficas adversas (PAUSAS et al., 2004). Aunque en ambientes secos y semiáridos el agua es el recurso más limitante para el establecimiento de las plantas (DI CASTRI et al., 1981), la limitación nutricional también puede afectar a la instalación y posterior desarrollo de la plantación (MAMOLOS et al., 1995; HENKIN et al., 1998; VALDECANTOS, 2001). La aplicación de residuos orgánicos ricos en macro y micronutrientes puede mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo el establecimiento de la plantación (ROLDÁN et al., 1996; QUEREJETA et al., 1998; CARAVACA et al., 2003), aunque la supervivencia de especies forestales no suele verse mejorada (LOFTIN & AGUILAR, 1994; VALDECANTOS, 2001; FUENTES et al. 2007). Por otro lado, hay aspectos potencialmente negativos para la planta introducida, que están asociados a la aplicación de lodos, como puede ser el incremento excesivo de salinidad en el suelo del hoyo de plantación (CHENG et al., 2007; FUENTES et al., 2007), la presencia de metales pesados (WONG et al., 2001), o el deterioro de las propiedades físicas del suelo (FUENTES et al., 2007).

Dado el delicado balance entre impactos positivos y negativos, la determinación de las dosis de aplicación es un aspecto clave para la optimización del uso de lodos de depuradora en repoblaciones forestales en ambiente mediterráneo. En este trabajo evaluamos la supervivencia y respuesta morfológica de brinzales de *Pinus halepensis* sometidos a diferentes dosis de lodo de depuradora compostado o secado al aire, durante los tres primeros años tras la plantación.

MATERIALES Y MÉTODOS

En febrero de 2003 establecimos una parcela experimental de repoblación con brinzales de una savia de *Pinus halepensis* en el término municipal de Enguera (Valencia). La parcela se encuentra situada en una zona con pendientes inferiores al 15%, a 473 m s.n.m. y bajo clima

Mesomediterráneo seco-subhúmedo (493 mm y 12,7°C de precipitación y temperatura medias, respectivamente) caracterizado por fuertes sequías estivales. En general, los suelos son carbonatados y desarrollados sobre sustrato margocalizo. Tras dos incendios en los últimos 25 años la zona está dominada por un estrato arbustivo de baja densidad formado principalmente por *Rosmarinus officinalis*, *Quercus coccifera*, *Cistus albidus* y *Ulex parviflorus*.

Se ensayaron dos tipos diferentes de lodo de depuradora; uno secado al aire tras digestión anaerobia (*lodo seco*) procedente de la estación depuradora de Ayora (Valencia), y otro compostado (*compost*), producido en la planta de Aspe (Alicante) (Tabla 1). En ambos casos se utilizaron 5 dosis de aplicación (equivalentes a 0, 15, 30, 45 y 60 Mg peso seco ha⁻¹), resultando un total de nueve tratamientos que se replicaron en 25-30 brinzales. El ahoyado se realizó con retroexcavadora con cazo de 40 cm y el biosólido se añadió y mezcló *in situ* con el suelo del hoyo en el momento de la plantación, quedando totalmente incorporado al suelo.

Se realizó un seguimiento periódico de la supervivencia y del crecimiento en altura y diámetro basal de los brinzales. En varias fechas se calculó la concentración letal del lodo que disminuía la supervivencia de la población control en un 10% (LC10) a partir de curvas de regresión obtenidas entre las dosis de lodo y los porcentajes de supervivencia de los brinzales.

A partir de los datos de supervivencia y crecimiento en diámetro se calculó el Índice de Efecto Relativo (REI, Relative Effect Index), a partir de ARMAS et al. (2004), en función de los valores de área basal obtenidos:

$$REI_V = \frac{V_T - V_C}{V_T + V_C}$$

donde V_T es el valor de una variable dada en el tratamiento T y V_C es el valor observado en el tratamiento control.

Durante el primer verano se determinó la conductividad eléctrica (1:5; p:v) en 10 hoyos por tratamiento (excepto en la dosis de 45 Mg.ha⁻¹) en los primeros 20 cm del hoyo de plantación.

El análisis de los datos de morfología se realizó mediante un ANOVA de un factor con 9 niveles, en el que cada combinación de produc-

VARIABLES AGRONÓMICAS	Unidades	Compost Aspe	Lodo Ayora
Humedad	%	40	10
Materia orgánica total	%	62,6	38,3
Carbono orgánico oxidable	%	29,1	22,2
pH (1:10) -	6,3	6,7	
Conductividad Eléctrica (1:10)	dS.m ⁻¹	5,54	
Relación C/N -	10	4,3	
Nitrógeno total (N)	%	2,98	3,5
Fósforo total %	0,67	1,57	
<i>Fósforo total (P₂O₅)</i>	%	1,55	
Potasio total (K)	%	0,49	1,57
<i>Potasio total (K₂O)</i>	%	0,58	
Calcio total (Ca)	%	3,98	
<i>Calcio total (CaO)</i>	%	5,57	
Magnesio total (Mg)	%	0,49	
<i>Magnesio total (MgO)</i>	%	0,81	
Sodio (Na) %	0,76		
Hierro (Fe)	ppm	32032	2448
Manganeso (Mn)	ppm	213	70
METALES PESADOS			
Cadmio (Cd)	ppm	3	<2
Cromo (Cr)	ppm	43	25
Cobre (Cu)	ppm	169	131
Plomo (Pb)	ppm	231	54
Zinc (Zn)	ppm	504	480
Niquel (Ni)	ppm	17	16
Mercurio (Hg)	ppm	0,1	<0,75

Tabla 1. Características físico-químicas de los biosólidos empleados en este estudio

to y dosis representa un nivel. Los porcentajes de altura y diámetro basal relativos obtenidos fueron transformados en logaritmos para este análisis. La relación entre las dosis aplicadas y los porcentajes de mortalidad o la salinidad edáfica se analizó mediante regresiones y ajuste de ecuaciones cuadráticas o lineales.

RESULTADOS

A lo largo del tiempo el patrón de mortalidad se mantuvo relativamente constante entre tratamientos, mejorando la supervivencia respecto al control ligeramente con las dosis más bajas de ambos productos, e incrementando la mortalidad considerablemente en las más altas. Tres

años después de la plantación, el porcentaje de mortalidad fue elevado (>50% en cualquier tratamiento). La dosis de 15 Mg.ha⁻¹ de compost apenas incrementó el porcentaje de supervivencia respecto al tratamiento control, mientras que con la misma dosis de lodo, este porcentaje incrementó en un 16%. A partir de 30 Mg.ha⁻¹ de compost y 45 Mg.ha⁻¹ de lodo la mortalidad aumentó, alcanzando su máximo con la aplicación de 60 Mg.ha⁻¹ (Tabla 2). El comportamiento de los dos productos fue similar, aunque el compost disminuyó ligeramente la supervivencia de brinzales en todos los tratamientos respecto al lodo seco (entre un 6 y 12%).

El LC10 de la aplicación de ambos tipos de biosólido después del tercer verano tras la plantación fue de 33 Mg.ha⁻¹ para el compost y de 46

Dosis (Mg ha ⁻¹)	Altura relativa (%)		Diámetro relativo (%)		Supervivencia (%)	
	Compost	Lodo	Compost	Lodo	Compost	Lodo
0	100 ± 13a		100 ± 18a		32	
15	162 ± 16ab	167 ± 15ab	159 ± 16ab	171 ± 13ab	37	48
30	203 ± 23b	185 ± 24ab	178 ± 23ab	200 ± 25b	28	38
45	146 ± 20ab	182 ± 25ab	150 ± 26ab	152 ± 14ab	21	26
60	133 ± 26ab	126 ± 22ab	126 ± 28ab	125 ± 25ab	13	11

Tabla 2. Altura relativa, diámetro basal relativo y supervivencia de los brinzales de *Pinus halepensis*, 3 años después de la plantación. Letras distintas dentro de cada variable indican diferencias significativas (ANOVA de un factor, $p < 0,05$)

Mg.ha⁻¹ para el lodo seco frente a 21 y 26 Mg.ha⁻¹, respectivamente, alcanzados tras el primer verano (Tabla 3). La mortalidad tras este primer período seco en el campo se relacionó con la salinidad del suelo en el hoyo de plantación, intensificándose el efecto a partir de valores mayores de 0.28 dS.m⁻¹, valores que suponen incrementos de hasta el 25% respecto al promedio obtenido en los suelos control (0,23 ± 0,01 dS.m⁻¹) (Figura 1).

Transcurridos tres años desde la plantación, la aplicación de 30 Mg.ha⁻¹ de compost incrementó la altura de los brinzales en un 103% respecto al tratamiento control ($F = 2,09$; $P = 0,040$), mientras

que la misma dosis de lodo incrementó el diámetro basal en un 78% ($F = 2,21$; $P = 0,037$). El índice de efecto relativo aplicado al área basal de los brinzales tratados mostró una influencia muy positiva de las dosis más bajas frente a los valores negativos de dicho índice con la dosis de 60 Mg.ha⁻¹ en ambos productos (Figura 2).

DISCUSIÓN

La aplicación de biosólidos en el hoyo de plantación con varias de las dosis empleadas en

	Septiembre 2003	R ²	LC10	Octubre 2006	R ²	LC10
Compost	$y = 78,7 - 0,451x$	0,611	21	$y = 33,4 + 0,102x - 0,0077x^2$	0,933	33
Lodo	$y = 78,27 + 0,0224x - 0,0139x^2$	0,984	26	$y = 34,5 + 0,8147x - 0,0206x^2$	0,919	46

Tabla 3. Ecuaciones de ajuste entre la supervivencia de los brinzales y las dosis de aplicación en dos fechas distintas. LC10 (Mg ha⁻¹) es la concentración letal del lodo que reduce la población control en un 10%

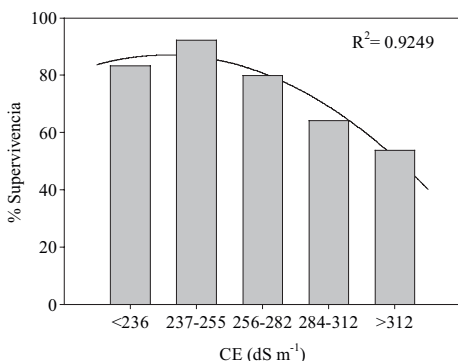


Figura 1. Relación entre la supervivencia de los brinzales tras el primer verano y la salinidad del suelo. Cada rango de CE comprende 13-15 individuos

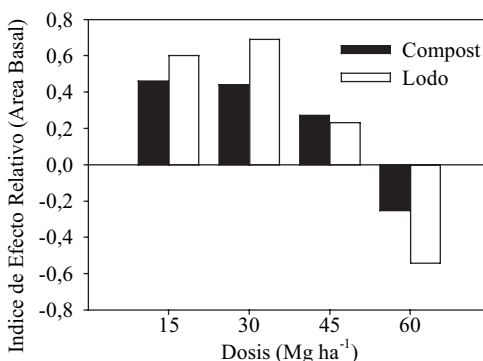


Figura 2. Índice de Efecto Relativo aplicado sobre el área basal resultante de la aplicación de los tratamientos. Valores > 0 indican efectos netos positivos, mientras que valores < 0 indican efectos negativos, ambos respecto al tratamiento control

este estudio ha resultado positiva para la supervivencia y el crecimiento de la repoblación. El patrón de mortalidad encontrado tras los 3 primeros años es el mismo que tras el primer verano, donde se observó una relación positiva de la mortalidad con el incremento de la dosis de aplicación. La mineralización de la materia orgánica añadida, junto con las sales ya contenidas en ambos productos provocó un aumento de la salinidad del hoyo de plantación (datos no mostrados). El incremento de sales en la rizosfera de la planta puede causar la inhibición del crecimiento radical por toxicidad (JACOBS & TIMMER, 2005), o por la disminución del potencial hídrico del suelo (estrés salino) en los períodos más secos (JACOBS *et al.*, 2004). Esto ocurre principalmente durante el primer verano, cuando el sistema radical todavía no ha colonizado el suelo más allá del hoyo. La alta mortalidad registrada al final del experimento se ha podido deber, en parte, a las escasas precipitaciones registradas durante 2005, y particularmente entre abril y julio (47% y 22%, del promedio histórico y del mismo período del año anterior, respectivamente).

Por otra parte, el incremento del LC10 en el tercer año con respecto al año de la plantación significa que las plantas control han mostrado una mayor tasa de mortalidad en estos dos últimos años respecto a los tratamientos fertilizados, lo que podría indicar una mayor resistencia a episodios de déficit hídrico con la mejora del estado nutricional, superada la fase de arraigo (FIFE & NAMBIAR, 1995). El índice de efecto relativo del área basal integra los efectos de supervivencia y crecimiento y muestra que las dosis de aplicación, bajo las condiciones de nuestro estudio, no deben superar los 30 Mg.ha⁻¹. Estas cantidades podrían variar como consecuencia de variaciones en la profundidad del suelo, profundidad de mezcla del biosólido, y los regímenes de lluvia.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada parcialmente por el Ministerio de Medio Ambiente (proyectos OLORES, exp n°174/2004/3 y BIOMET, exp. 608/2006/1-4.4). La Fundación CEAM está financiada por la Generalitat Valenciana y por Bancaixa.

BIBLIOGRAFÍA

- CARAVACA, F.; FIGUEROA, D.; AZCÓN-AGUILAR, C.; BAREA, J.M. & ROLDÁN, A.; 2003. Medium-term effects of mycorrhizal inoculation and composted municipal waste addition on the establishment of two Mediterranean shrub species under semiarid field conditions. *Agr. Ecosyst. Environ.* 97: 95-105.
- CHENG, H.; XU, W.; LIU, J.; ZHAO, Q.; HE, Y. & CHEN, G.; 2007. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth. *Ecol. Eng.* 29: 96-104.
- DI CASTRI, F.; GOODALL, D.W. & SPECHT, R. L.; 1981. *Mediterranean-type shrublands*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.
- FIFE, D. N. & NAMBIAR, E.K.; 1995. Effect of nitrogen on growth and water relations of radiata pine families. *Plant Soil* 168: 279-285.
- FUENTES, D.; VALDECANTOS, A.; CORTINA, J. & VALLEJO, V. R.; 2007. Seedling performance in sewage sludge-amended degraded Mediterranean woodlands. *Ecol. Eng.* 31: 281-291.
- HALL, J.; 1999. Ecological and economical balance for sludge management options. *In*: H. Langenkamp and L. Marmo (eds.), *Proceedings of Workshop on Problems Around Sludge*.
- HENKIN, Z.; SELIGMAN, N.G.; KAFKAFI, U. & NOY-MEIR, I.; 1998. 'Effective growing days': a simple predictive model of the response of herbaceous plant growth in a Mediterranean ecosystem to variation in rainfall and phosphorus availability. *J. Ecol.* 86: 137-148.
- JACOBS, D.F. & TIMMER, V.R.; 2005. Fertilizer-induced changes in rhizosphere electrical conductivity: relation to forest tree seedling root system growth and function. *New Forests*. 30: 147-166.
- JACOBS, D.F.; ROSE, R.; HAASE, H.L. & Alzugaray, P.O.; 2004. Fertilization at planting impairs root system development and drought avoidance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. *Ann. For. Sci.* 61: 643-651.
- LOFTIN, S.R. & AGUILAR, R.; 1994. Semiarid rangeland response to municipal sewage sludge:

- plant growth and litter decomposition. In: *Sewage sludge: Utilization and the Environment*: 221-229. SSSA Misc. Publ. Madison.
- MAMOLOS, A.P.; ELISSEOU, G.K. & VERESOGLOU, D.S.; 1995. Depth of root activity of coexisting grassland species in relation to N and P additions, measured using nonradioactive tracers. *J. Ecol.* 83: 643-652.
- PAUSAS, J.G.; BLADÉ, C.; VALDECANTOS, A.; SEVA, J.P.; FUENTES, D; ALLOZA, J.A.; VILAGROSA, A.; BAUTISTA, S.; CORTINA, J. & VALLEJO, V.R.; 2004. Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: new perspectives for an old practice – a review. *Plant Ecol.* 171: 209–220.
- QUEREJETA, J.I.; ROLDÁN, A.; ALBALADEJO, J. & CASTILLO, V.; 1998. The role of mycorrhizae, site preparation, and organic amendment in the afforestation of a semi-arid Mediterranean site with *Pinus halepensis*. *For. Sci.* 44: 203-211.
- ROLDÁN, A.; QUEREJETA, I.; ALBALADEJO, J. & CASTILLO, V.; 1996. Survival and growth of *Pinus halepensis* Miller seedlings in a semi-arid environment after forest soil transfer, terracing and organic amendments. *Ann. For. Sci.* 53: 1099-1112.
- VALDECANTOS, A.; 2001. *Aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la repoblación de zonas forestales degradadas de la Comunidad Valenciana*. Ph D Thesis. Universidad de Alicante. Alicante.
- WONG, J.W.; LAI, K.M.; SU, D.S. & FANG, M.; 2001. Availability of heavy metals for *Brassica chinensis* grown in an acidic loamy soil amended with a domestic and an industrial sewage sludge. *Water Air Soil Pollut.* 128: 339-353.