CAPTURA DE C EN TERRENOS AGRÍCOLAS REFORESTADOS EN EL NORTE DE ESPAÑA

César Pérez-Cruzado, Pablo N. Mansilla-Salinero, Roque Rodríguez-Soalleiro y Agustín Merino García

Unidad de Gestión Forestal Sostenible. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. 27002-LUGO (España). Correo electrónico: amerino@lugo.usc.es

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo el estudio de la evolución de la captura de C en biomasa arbórea y suelos en plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. establecidas sobre tierras agrícolas. Para ello se estudiaron 80 parcelas agrícolas, en las que parte de su superficie fue reforestada con estas especies. La reforestación supuso una captura media en la biomasa arbórea de 9 Mg C.ha^{-1}.año^{-1} para *Pinus radiata* y de 17 Mg C.ha^{-1}.año^{-1} para *Eucalyptus* spp., que es sensiblemente superior a las tasas registradas en plantaciones sobre terrenos forestales para estas especies. El mantillo comienza a acumularse a partir de los 5 años de la repoblación, siendo la cantidad máxima de C acumulado de 50 Mg C.ha^{-1} (1,6 Mg C.ha^{-1}.año^{-1}) para *Pinus radiata* y de 19 Mg C.ha^{-1} (0,8 Mg C.ha^{-1}.año^{-1}). En los suelos bajo la plantación de *Pinus radiata* ocurre una ganancia neta de C después de 17-20 años de la reforestación y se limita a los primeros 15 cm. Aunque el suelo captura C a un ritmo inferior que la biomasa (entre 0,5 y 3 Mg C.ha^{-1} en 40 años) hay que considerar que, a diferencia de ésta, se trata de una ganancia neta mientras no haya un cambio de uso. En los suelos bajo *Eucalyptus* spp. se observó una pérdida de C en el suelo mineral para el periodo estudiado.

Palabras clave: *Reforestación; Captura de carbono; Biomasa, Materia orgánica del suelo*

INTRODUCCIÓN

Puesto que los terrenos agrícolas funcionan, en general, como emisores de gases con efecto invernadero y los forestales, como acumuladores de C, el aumento de la superficie forestal contribuye a fijar parte del CO_2 atmosférico. Los datos recientes muestran que los sistemas forestales de Europa están almacenando entre 9-12% de las emisiones antropogénicas de CO_2, mientras que el almacenamiento de C en los suelos supone, de momento, el 3% de estas emisiones (LISKI et *al.*, 2002). El C acumulado en el sumidero edáfico, en forma de materia orgánica, tiene una gran importancia debido a la elevada estabilidad de algunos de los compuestos en los que se retiene, habiéndose observado tiempos de permanencia en algunos compuestos de entre 1000 y 3000 años (CARBALLAS et *al.*, 1980).

En el marco del programa nacional de reforestación de tierras agrarias, desde 1994 se han repoblado 600.000 ha en España. El proceso de reforestación ha sido especialmente importante en el norte del país, donde la superficie forestal aumenta a un ritmo anual de 1,5%, fundamentalmente como consecuencia de la reforestación de terrenos agrícolas con especies de rápido crecimiento, como son *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, y es esperable que esta tasa al menos se mantenga, con la proliferación de plantaciones energéticas.

ISSN: 1575-2410

© 2008 Sociedad Española de Ciencias Forestales

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la evolución de la captura de C en biomasa arbórea, mantillo y suelos en plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. (*E. globulus* y *E. nitens*) establecidas sobre tierras agrícolas abandonadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características generales de la zona

Para la realización de este trabajo se eligieron 80 parcelas localizadas en las provincias de Lugo y A Coruña. Estas parcelas se localizan en una zona climática homogénea, con temperaturas anuales entre 12-14ºC y la amplitud térmica anual entre 12,5-14,5ºC y una estacionalidad pluviométrica moderada, con una precipitación anual 800-1200 mm y un balance hídrico anual de 200-600 mm.

Las parcelas se asientan fundamentalmente sobre suelos desarrollados sobre dos tipos de materiales geológicos, granitos y esquistos-pizarras, materiales que representan el 91% de la región. Los tipos de suelos mas frecuentes fueron los *Regosoles úmbricos* y *Cambisoles húmicos* (RGu-C-Mu) sobre material geológico de partida granítico, y los *Cambisoles húmicos* y *Regosoles úmbricos* (CMu-RGu) en las ensayos establecidos sobre pizarras y esquistos (FAO, 1998)

Estas parcelas se sitúan en áreas dedicadas inicialmente por completo a uso agrícola y que posteriormente fueron parcialmente reforestadas con *Pinus radiata* o *Eucalyptus* spp. Las edades de plantación más avanzadas fueron de hasta 40 años para pino radiata y 24 años para eucalipto, que suelen ser las rotaciones más prolongadas para estas especies en la región. Los cultivos más frecuentes en la subparcela agrícola fueron maíz forrajero, cereal o pradera intensiva. El uso actual de la parte forestal fue en todos los casos plantación de *Pinus radiata* D. Don o de *Eucalyptus* spp. con unas densidades iniciales de 1700 pies.ha^{-1}.

Medidas dasométricas, toma de muestras y estimación del C acumulado

Para evaluar el C acumulado en la biomasa, se establecieron unas parcelas dentro de la zona forestal de 10 m de radio, en la que se midieron el diámetro y la altura de todos los pies mediante una forcípula y un hipsómetro Vertex III. Para la determinación del C contenido en la biomasa forestal se emplearon las ecuaciones de biomasa y los contenidos medios observados para cada fracción y especie por BALBOA (2005) para la biomasa aérea y por MONTERO et *al*. (2005) y O´GRADY et *al*. (2005) para la biomasa radicular de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. respectivamente (Tabla 1).

En cada una de estas áreas se fijaron cinco puntos, donde se tomaron muestras de suelo mineral a tres profundidades (0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm) mediante tubos 8 cm de diámetro y 20 cm de profundidad. Las muestras se secaron en una estufa a 40ºC y se tamizaron a 2 mm. Se determinó la pedregosidad, por gravimetría, y la concentración de C orgánico total mediante un autoanalizador CNS-2000 (LECO, St Joseph, Michigan, EE.UU). Para la determinación del contenido total de C en el suelo a cada profundidad considerada se tuvo en cuenta la concentración de C, la densidad aparente (estimada

Componentes	Pinus radiata			Eucalyptus spp.		
	Ecuaciones de biomasa	r^2	Contenido de C (mg. g^{-1})	Ecuaciones de biomasa	r^2	Contenido de C (mg. g^{-1})
Madera	$W=0{,}0123\cdot d^{1.6042}\cdot h^{1.4131}$	0,96	0,504	$W= -8{,}9995+0{,}036\cdot d^{2}\cdot h$	0,97	0,452
Corteza	$W=0{,}0036\cdot d^{2.6564}$	0,92	0,541	$W= -1{,}7087+0{,}0059\cdot d^{2}\cdot h$	0,85	0,425
Ramas gruesas	$W=1{,}937699+0{,}001065d^{2}\cdot h$	0,66	0,513	$W= 44{,}2207-5{,}0722\cdot d+0{,}1981\cdot d^{2}$	0,78	0,451
Ramas finas	$W=0{,}0363\cdot d^{2.6091}\cdot h^{-0.9417}$	0,81	0,525	$W=0{,}0363\cdot d^{2.6091}\cdot h^{-0.9417}$	0,70	0,455
Ramillos	$W=0{,}0078\cdot d^{1.9606}$	0,69	0,532	$W= 0{,}003\cdot d^{2.8908}$	0,79	0,464
Acículas / Hojas	$W=0{,}0423\cdot d^{1.7141}$	0,79	0,527	$W=0{,}0009\cdot d^{2.8783}$	0,67	0,520
Raíces	$W={}_{e}(0{,}309544^{2}/2)\cdot{}_{e}-2{,}78485\cdot d^{2.14449}$	0,94	0,497	$Y= 0{,}31\cdot\sum W+0{,}02$	0,81	0,477

***Tabla 1**. Ecuaciones utilizadas para la cuantificación de la biomasa forestal por fracciones ajustadas por BALBOA (2005), MONTERO et al. (2005) y O´GRADY et al. (2005) y concentraciones de carbono observadas para cada fracción*

mediante cilindros metálicos de 100 cm^3 en cinco puntos por parcela) y la pedregosidad.

Para evaluar el C acumulado en el mantillo se tomaron de muestras en cinco puntos elegidos aleatoriamente dentro de la subparcela forestal. Mediante unas cubetas cuadradas de 30x30 cm se recogió todo el mantillo que abarcaban las mismas, para secarlo a 60ºC y pesarlo. El contenido en C se determinó mediante la concentración media observada por BALBOA (2005) para esta especie (46,9%) en la región.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenidos de C en biomasa arbórea

En la figura 1 se representa la evolución del C acumulado en la biomasa arbórea. Se observa que a partir de los 13 años de la reforestación, las plantaciones seleccionadas mostraron una gran variabilidad en el contenido de C capturado en la biomasa, lo que responde a los diferentes tratamientos silvícolas practicados. Las tasas medias de captura de C en biomasa arbórea a edades avanzadas (40 años para pino radiata y 25 para eucalipto) fue de entorno a 9 Mg $C.ha^{-1}.año^{-1}$ para las parcelas de pino radiata y de 17 Mg $C.ha^{-1}.año^{-1}$ para las masas de eucalipto.

Los valores observados de acumulación de C en biomasa fueron sensiblemente superiores a los observados en plantaciones adultas de Pinus radiata y Eucalyptus globulus sobre terrenos forestales de la zona (MERINO et *al*., 2003, 2005; BALBOA et *al*., 2006a). Estas diferencias pueden responder en parte a los distintos tratamientos silvícolas pero, sobre todo, a las mejores condiciones de fertilidad sobre las que se asientan estas plantaciones.

Aunque una comparación directa con otros sistemas forestales es difícil de realizar por las distintas edades, tasas de crecimiento y labores silvícolas, entre otros factores, conviene realizar una valoración de las cantidades de C capturadas por estas masas con respecto a las de otro tipo de masas forestales del Norte de España. Los contenidos totales de C en biomasa arbórea en las plantaciones de *Pinus radiata* a edades avanzadas (>30 años), entre 200 y 420 Mg $C.ha^{-1}$, son comparables a las cantidades acumuladas por las plantaciones de *Eucalyptus* spp. a edades entre 10-25 años. También son similares a los registrados en bosques naturales y seminaturales de *Fagus sylvatica* L. (150 y 325 Mg $C.ha^{-1}$; MERINO et *al*., 2007) y a los de bosques seminaturales de *Quercus robur* L. (80-250 Mg $C.ha^{-1}$; BALBOA et *al*., 2006b). Hay que considerar, no obstante, que el C capturado en estos sistemas naturales permanece más tiempo estable, no sólo porque estos bosques se aprovechan parcialmente, sino porque también su madera se destina a aserrado fundamentalmente.

Ganancia de C en el mantillo

La formación del mantillo es de una importancia trascendental en la dinámica del C de un ecosistema forestal como fuente de materia orgánica al suelo, además de reservorio de nutrientes a medio plazo (VESTERDAL et *al*., 2002). En la figura 2 se recoge la evolución de los contenidos de C en el mantillo de las parcelas de ensayo con la edad. En estas plantaciones el mantillo aparece a una edad próxima a 5 años, coincidiendo con la tangencia de copas en las parcelas de *Pinus radiata*. Como se puede apreciar, los contenidos tienden a estabilizarse en

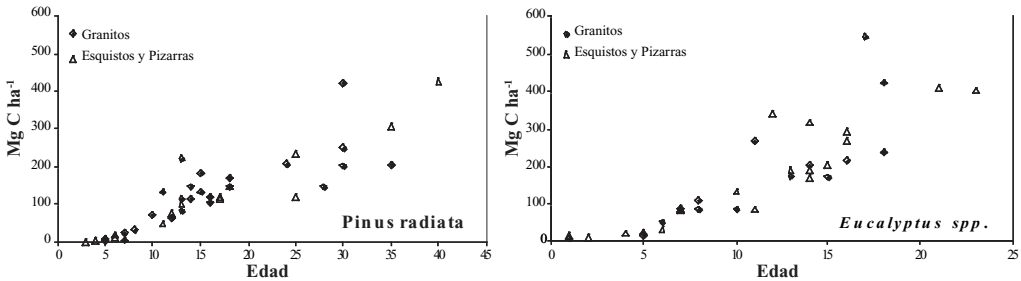

***Figura 1**. Evolución con la edad de los contenidos de C ($Mg.ha^{-1}$) de la biomasa arbórea total (madera, corteza, ramas gruesas, ramas finas, ramillos, acículas u hojas y raíces)*

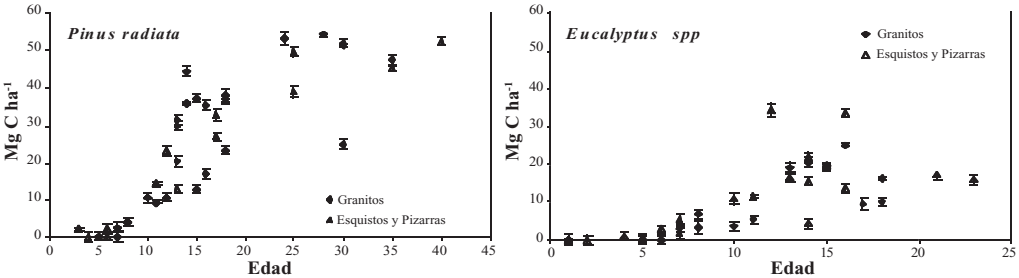

***Figura 2**. Cantidad de C acumulado en el mantillo (Mg.ha-1) en función de la edad de plantación y del material de partida*

valores en torno a 50 Mg.ha^{-1} a una edad de 20-25 años para las parcelas de *Pinus radiata*, y en 19 Mg.ha^{-1} a una edad de 15-20 años para las parcelas de *Eucalyptus* spp.

Los contenidos en C en el mantillo observados en las parcelas adultas de *Pinus radiata* son superiores al valor medio de plantaciones adultas de esta especie sobre suelos forestales, que ha sido cifrado en 33,2 Mg.ha^{-1} (MERINO et *al.*, 2005), lo que podría deberse a la mayor producción de hojarasca debido a la superior producción. Por otro lado, la cantidad de C acumulado en el mantillo bajo las plantaciones de *Eucalyptus* spp. en las parcelas de mayor edad, son similares a los observados para *Eucalyptus globulus* sobre terrenos forestales (17 Mg C.ha^{-1}; MERINO et *al.*, 2005). Estos contenidos, para el caso de las plantaciones de eucalipto, son similares a los observados en bosques de *Fagus sylvatica* (10 Mg C.ha^{-1}) (MERINO et *al.*, 2007) y *Quercus robur* del sur de Europa (18-25 Mg C.ha^{-1}; BALBOA et *al.*, 2006a), mientras que las plantaciones de pino radiata presentaron un contenido de C en mantillo bastante superior a estas masas naturales. Una causa de este mayor contenido de C en el mantillo en estas plantaciones puede ser la menor tasa de descomposición de la hojarasca como consecuencia de la menor concentración en Ca y otros nutrientes, así como por la menor iluminación en estas masas debido a su naturaleza perenne. Para el intervalo de edad considerado se observó una tasa de acumulación media de C en mantillo de 1,6 y 0,8 Mg.C.ha^{-1}.año^{-1} para pino radiata y eucalipto respectivamente. No existen diferencias claras entre las cantidades encontradas sobre los diferentes tipos de suelo.

Captura de C en el suelo mineral

La ganancia de C en el suelo mineral como resultado de la reforestación se estimó mediante la diferencia entre los contenidos de C en la subparcela reforestada y los contenidos de C de la subparcela agrícola en el momento del muestreo (Figura 3).

A pesar de la variabilidad de los resultados y a la incertidumbre del diseño experimental sobre las ganancias reales de C (se asume que el contenido de C en la subparcela agrícola ha sido

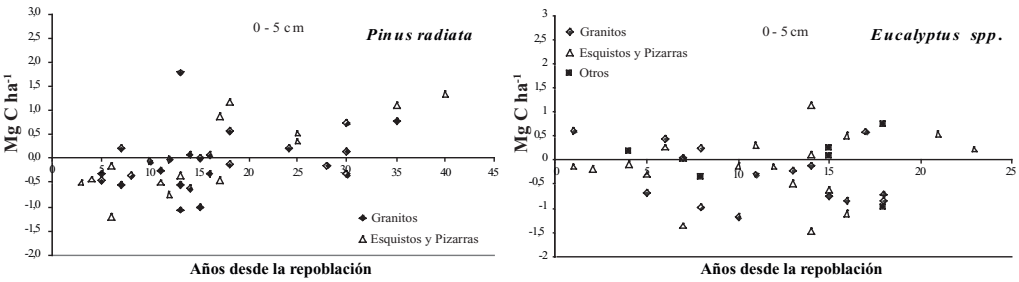

***Figura 3.** Diferencia en el contenido de C en los suelos minerales en los pares de subparcelas (forestal – agrícola) en cada profundidad estudiada*

estable), la figura referente a la ganancia ocurrida en las parcelas de pino radiata revela la existencia de tres fases en la dinámica de captura de C en un suelo tras la reforestación. En una primera fase, los contenidos de C de los suelos reforestados son inferiores a los agrícolas (valores negativos en la figura), a una edad intermedia (7 y 15 años) se aprecia una ligera recuperación del contenido C en los suelos reforestados, y por último, a partir de los 20 años la mayor parte de las parcelas mostraron una ganancia neta bastante variable, que oscila entre 0,5 y 4 Mg C.ha^{-1}. Aunque las diferencias entre los dos tipos de suelos considerados no son importantes, los mayores incrementos en los suelos sobre pizarras-esquistos pueden deberse a los mayores aportes de hojarasca en respuesta a las superiores producciones. Para el caso de las plantaciones de *Eucalyptus* spp. parece que, para el margen de edades estudiados en esta cronosecuencia, aún existen pérdidas en el suelo en las edades más avanzadas estudiadas, si bien es posible que se esté cerca de la compensación.

Tendencias similares han sido descritas por otros autores bajo climas diferentes y otras especies forestales (VESTERDAL et *al*., 2002). La posible causa de la pérdida inicial puede ser que la hojarasca que se deposita sobre estos suelos en un momento inicial de la reforestación es escasa y fácilmente degradable (SCHIMEL et *al*., 1985), dado la importante actividad microbiana en respuesta a las óptimas condiciones de fertilidad (mayor pH, niveles disponibles de nutrientes) del suelo de cultivo. La tangencia de copas, que supone la aparición de mantillo y una menor temperatura, junto con la progresiva acidificación del suelo, serían los causantes de la reversión de este efecto (KURZ-BESSON et *al*., 2005).

La acumulación media de C en el suelo para ambos materiales litológicos de partida alcanzó valores de 2 Mg C.ha^{-1} a una edad de 40 años en las parcelas de pino radiata. Estos valores fueron similares a los observados para *Quercus robur* (2 Mg C.ha^{-1}), e inferiores a los observados para *Picea abies* (9 Mg C.ha^{-1}) tras reforestación de zonas agrícolas en centro Europa (VESTERDAL et *al*., 2002). Existen otros estudios que muestran tasas de acumulación de C superiores a las descritas en éste ensayo en climas más fríos (RICHTER et *al*., 1999), y también sobre clima mediterráneo (PAUL et *al*., 2002). Por el contrario, la bibliografía recoge también casos de descensos de C en el suelo tras la transformación de pastizales a plantaciones de coníferas (GUO & GIFFORD, 2002; TURNER & LAMBERT, 2000), que ha sido el efecto observado en las plantaciones de *Eucalyptus* spp.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado en el marco de un proyecto financiado por la Unión Europea (Programa INTERREG IIIB Espacio Atlántico) y el Instituto de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria del Gobierno de España. Los autores agradecen a Dña. Montserrat Gómez Dopazo, del Centro de Apoyo Científico de la Universidad de Santiago, por su labor analítica.

BIBLIOGRAFÍA

BALBOA, M.; 2005. *Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de Pinus pinaster, Eucalyptus globulus y Quercus robur en Galicia*. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela

BALBOA, M.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.J. & MERINO, A.; 2006a. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural regimes. *Forest Ecol. Manage*. 63: 557-565.

BALBOA, M.; ROJO, A.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. & MERINO, A.; 2006b. Carbon and nutrient stocks in mature Quercus robur L. stands in NW Spain. *Ann. For. Sci.* 63: 557-565.

CARBALLAS, M.; CARBALLAS, T.; GUITIAN, F. & CABANEIRO, A.; 1980. Organic-metallic complexes in Atlantic humiferous soils. *Anales Edaf. Agr.* 39: 1033-1043.

FAO-UNESCO; 1998. *Wold Reference for Soil Resource*. FAO. Roma.

GUO, L.B. & GIFFORD, R.M.; 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol*. 8: 345-360.

KURZ-BESSON, C.; COUTEAUX, M.M; BERG, B.; REMACLE, J.; RIVEIRO, C.; ROMANYA, J. & THIERY, J.M.; 2005. A climate response function explaning most of the variation of the forest floor needle mass and the deedle decomposition in pine forests across Europe. *Plant Soil* 285: 97-114.

LISKI, J.; PERRUCHOUD, D. & KARJALAINEN, T.; 2002. Increasing carbon stocks in forest soils of western Europe. *Forest Ecol. Manage.* 169: 159-175.

LUGO, A.E. & BROWN, S.; 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant Soil.* 149: 27-41.

MERINO, A.; REY, C.; BRAÑAS, J. Y RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R.J.; 2003. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de Pinus radiata D. Don en Galicia. *Inv. Agrar.: Sist. Rec. For.* 12: 85-98.

MERINO, A.; BALBOA, M.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.J. & ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; 2005. Nutritional exports under different harvesting regimes in southern Europe. *Forest Ecol. Manage.* 207: 325-339.

MERINO, A.; REAL, C.;. ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. & RODRÍGUEZ-GUITIÁN, M.A.; 2007. Forest structure and C stocks in natural Fagus sylvatica forest in southern Europe: The effects of past management. *Forest Ecol. Manage.* (en prensa)

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R. Y MUÑOZ, M.; 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO_2 por los bosques españoles*. Monografías INIA. Serie Forestal nº 13. Madrid.

O´GRADY, A.; WORLEDGE, D. & BATTAGLIA, M.; 2006. Abobe- and below-ground relationships, with particular reference to fine roots, in a young Eucalyptus globulus Labill. stand in southern Tasmania. *Trees* 20: 531-538.

PAUL, K.I.; POLGLASE, P.J.; NYAKUENGAMA, J.G. & KHANNA, P.K.; 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecol. Manage.* 168: 241-257.

RICHTER, D.D.; MARKEWITZ, D.S.; TRUMBORE, E. & WELLS, C.G.; 1999. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature 400*: 56-58.

RÖMKENS, P.F.; VAN DER PFLICHT, J. & HASSINK, J.; 1999. Soil organic matter dynamics after the conversion of arable land to pasture. *Biol. Fert. Soils* 28: 277-284.

SCHIMEL, D.S.; COLEMAN, D.C. & HORTON, K.A.; 1985. Soil organic matter dynamics in paired rangeland and cropland toposequences in North Dakota. *Geoderma* 36: 201-214

TURNER, J. & LAMBERT, M.; 2000. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecol. Manage.* 133: 231-247.

VESTERDAL, L.; RITTER, E. & GUNDERSEN, P.; 2002. Change in soil organic carbon following afforestation on former arable land. *Forest Ecol. Manage.* 169: 137-147.