

EVALUACIÓN DE LA TRANSPIRACIÓN DE *EUCALYPTUS GLOBULUS* MEDIANTE LA DENSIDAD DE FLUJO DE SAVIA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS Y DENDROMÉTRICAS

Jiménez, E., Vega, J.A.*, Pérez-Gorostiaga, P., Fonturbel, T., Cuiñas, P., Fernández, C.

Departamento de Protección Ambiental. Centro de Investigación e Información Ambiental de Lourizán (CIIAL). Xunta de Galicia. Aptdo. Correos 127, CP 36080. Pontevedra

*Autores para la correspondencia:: jvega.cifal@siam-cma.org

Boletín del CIDEU 3: 119-138 (2007)

ISSN 1885-5237

Resumen

Eucalyptus globulus Labill. es una de las especies más extensamente utilizada en las plantaciones forestales del noroeste de España. Muchas cuencas hidrológicas que actúan como captadoras y reguladoras del agua disponible están pobladas por masas arboladas de esta especie. Por ello resulta esencial conocer mejor la transpiración de estas masas desde el punto de vista de su influencia en el ciclo hidrológico y en la producción de agua. Con esa finalidad se midió la densidad de flujo de savia en 15 individuos en una plantación de siete años de edad localizada cerca de Pontevedra (Galicia) durante parte de la primavera y verano de 1997 (82 días). Se observó una densidad de flujo de savia media diaria de 7,91 kg de agua por dm² de área basal normal del arbolado, y una transpiración media diaria de 1,78 kg por individuo para el período de estudio analizado. Se analizó la relación existente entre la densidad de flujo de savia media diaria y transpiración media diaria y determinadas variables meteorológicas, encontrándose que el número de horas de sol diario, el déficit de presión de vapor medio diario y el recorrido del viento explicaban de manera conjunta el 78% de la variación de la densidad de flujo de savia media diaria y el 75% de la variación de la transpiración media diaria. Se observó una alta relación lineal entre algunos parámetros dendrométricos (diámetro normal, área conductora, volumen de copa, superficie foliar) y la transpiración media durante el período de estudio, así como entre esta última variable y el crecimiento del arbolado (crecimiento radial, en altura, e incremento de biomasa), estimándose una producción media de 3,27 g de materia aérea seca por cada kilogramo de agua transpirada. Los valores de transpiración obtenidos son similares a los deducidos a partir del balance hídrico de cuencas. Algunas implicaciones de los resultados obtenidos desde el punto de vista del manejo de eucalipto son presentados.

Palabras clave: transpiración, crecimiento, / incremento de biomasa, cuencas hidrológicas.

Summary

Evaluation of transpiration of *Eucalyptus globulus* by sap flow density and its relationship with meteorological and dendrometric variables.

Eucalyptus globulus Labill. is one of the most widely used species in forest plantations in north-western Spain. Many watersheds, yielding and regulating water, are covered by this species. For this reason it is essential to increase the knowledge on the influence of transpiration of these stands in the hydrological cycle and water production. With this aim sap flow density was monitored in 15 trees in a seven-year-old plantation near Pontevedra (Galicia) during the spring – summer of 1997 (82 days). Mean daily sap flow density was 7,91 kg·dm⁻², and mean daily transpiration was 1,78 kg per tree for the period of time analyzed. Relationships between mean daily sap flow density-transpiration and meteorological parameters were analyzed. Daily number of sunny hours, mean daily vapour pressure deficit and daily wind run jointly explained 78% of mean daily sap flow density variability and 75% of mean daily transpiration variability. A high lineal relationship was observed between some dendrometric parameters (diameter at breast height, sapwood area, crown volume, leaf area) and mean daily transpiration during the period of study. A high relationship was observed as well between mean daily transpiration and tree growth (radial growth, height growth and biomass increment). A mean production of 3,27 g of dry biomass per kilogram of transpired water was found. Estimated transpiration values were similar to those obtained by catchment water balance. Some implications from the results are presented that can be used for eucalypt stands management.

Keywords: transpiration, growth, biomass increment, watershed.

INTRODUCCIÓN

La superficie terrestre dedicada a plantaciones forestales (50 millones de hectáreas; Nielson, 2000) se ha incrementado en los últimos años en todo el mundo debido al aumento de demanda de productos leñosos y a la preservación de masas forestales protegidas. En el noroeste de España, *Eucalyptus globulus* Labill. es una de las especies más ampliamente utilizada en plantaciones forestales, cubriendo aproximadamente el 20% de la superficie forestal, ya sea en masas monoespecíficas o mixtas junto a *Pinus pinaster* (Ministerio de Medio Ambiente, 2000). Las plantaciones establecidas con especies del género *Eucalyptus* en diferentes regiones del planeta han sido motivo de controversias científicas y sociales, ya que se han relacionado con efectos negativos sobre el medio ambiente, tales como cambios en el micro-clima local, modificación del hábitat para la fauna, y reducción de nutrientes y humedad disponibles en el suelo (Bará *et al.*, 1985; Almeida y Riekerk, 1990; Calder *et al.*, 1993; Enge, *et al.*, 2005; Farley *et al.*, 2005; Soto *et al.*, 2005).

Sin embargo, el impacto negativo de este tipo de plantaciones no está claro debido, entre otros aspectos, a las dificultades en la evaluación precisa del consumo de agua del arbolado mediante la evapotranspiración (Calder, 1992; Greenwood, 1992; Martin *et al.*, 1996; David, *et al.*, 1997). Diferentes estudios han analizado el consumo de agua de masas de eucalipto, tanto en bosques nativos de Australia, su región de procedencia, (Dunn y Connor, 1993; Hatton *et al.*, 1995; Vertessy *et al.*, 1995, 1997, 1998; O'Grady *et al.*, 1999; Cornish y Vertessy, 2001), como en plantaciones forestales establecidas en Australia (Hunt y Beadle, 1998; Medhurst *et al.*, 2002), y en

otras regiones del planeta (Almeida y Riekerk, 1990; Calder *et al.*, 1992; Dye, 1996; David *et al.*, 1997; Soares y Almeida, 2001; Fetene y Beck, 2004; Farley *et al.*, 2005; Engel *et al.*, 2005). En Galicia se han desarrollado diferentes estudios sobre el posible efecto ecológico del eucalipto en el suelo y agua (Díaz-Fierros *et al.*, 1982; Bará *et al.*, 1985; Calvo de Anta, 1992; Gras *et al.*, 1993; Soto *et al.*, 2005; Fernández *et al.*, 2006).

La medición in situ de flujo de savia por árboles individuales ha cobrado gran importancia en estudios que analizan el rol que la transpiración juega en el ciclo hidrológico de masas forestales (Calder, 1992; Hatton *et al.*, 1995; Vertessy *et al.*, 1995; 1997; David *et al.*, 1997; O'Grady *et al.*, 1999; Wullschleger *et al.*, 2001; Gyenge *et al.*, 2003), pudiendo ser de gran ayuda a la hora de establecer una evaluación de los efectos hidrológicos de las plantaciones establecidas, en la determinación de la adecuación de la especie a ciertas condiciones de sitio (Calder, 1992; Engel *et al.*, 2005), y en el conocimiento de la influencia de la composición y estructura de la vegetación en la transpiración y producción de agua de una masa forestal (Dunn y Connor, 1993; Bréda *et al.*, 1995; Vertessy *et al.*, 1997; Hunt y Beadle, 1998; Lüttschwager *et al.*, 1999; Wullschleger, 2001; Medhurst *et al.*, 2002; Gyenge *et al.*, 2003). Además, nos permite conocer como contribuye la transpiración del arbolado en el balance hídrico, separándola del resto de componentes (Hatton *et al.*, 1995; Vertessy *et al.*, 1995; Lüttschwager *et al.*, 1999; Granier *et al.*, 2000; Wullschleger, 2001). Los valores de transpiración obtenidos mediante este sistema (volumen de agua) deben extrapolarse a superficie (altura de

columna de agua) para su interpretación hidrológica (Hatton *et al.*, 1995).

En este estudio se analiza la transpiración de una típica masa juvenil de *E. globulus* en el área costera del sur de Galicia, su relación con parámetros dendrométricos, crecimiento, acumulación de biomasa del arbolado y determinados parámetros meteorológicos.

MATERIAL Y METODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo durante el año 1997 en el monte del Sino (Lourizán) cerca de la ciudad de Pontevedra (noroeste de España; 43°30' N y 8°38' O) en una plantación de *E. globulus* de siete años de edad. El suelo es leptosol alumi-úmbrico, con textura franca arenosa (Macías y Calvo, 2001) y poco profundo (50 cm). El clima es oceánico, templado y lluvioso, con una precipitación media anual de 1.715 mm, con un corto período de sequía de 1-2 meses. La temperatura media anual de 14°C. La vegetación del sotobosque es típica de brezal costero, con predominio de Ericáceas (*Calluna vulgaris*, y *Erica cinerea*) y helecho (*Pteridium aquilinum*).

Se seleccionaron 15 individuos con un diámetro normal que oscilaba entre los 4,1 y 7,1 cm (un valor medio de 5,2 cm), y una altura entre 5,9 y 9,5 m (con un valor medio de 7,8 m). La densidad del arbolado es de 1.200 pies/ha (Tabla 1).

Densidad de flujo de savia y transpiración

La transpiración se midió mediante el uso de sensores de disipación de calor (Granier, 1985, 1987), que consisten en una sonda calentada de manera continua insertada en el área conductora 12 cm por encima de otra que se mantiene a la temperatura del área conductora. Las sondas se colocaron a 130 cm del suelo, en la cara norte del tronco, con el fin de minimizar el efecto del calentamiento solar, y la zona de inserción de las sondas se cubrió con una carcasa plástica adosada al tronco, pero dejando un espacio de aire, y revestido de aislante térmico para evitar la insolación directa sobre el tronco. Ambas sondas contienen termopares tipo T cobre-constatan, y la diferencia de temperatura existente entre las sondas permite determinar la densidad de flujo de savia ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) mediante una ecuación empírica establecida por Granier (1987):

Tabla 1. Características medias del arbolado monitorizado. Entre paréntesis: Error típico.

dbh (cm)	Altura (m)	Ancho copa (m)	Volumen copa (m^3)	Área conductora (dm^2)	Superficie foliar (m^2)
5,2 (0,3)	7,8 (0,3)	1,17 (0,04)	1,50 (0,22)	0,22 (0,03)	2,4001 (0,3317)

$$DFS = 4,28 \cdot [(\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T]^{1,231} \quad [1]$$

Siendo ΔT la diferencia de temperatura entre la sonda calentada y la de referencia y ΔT_{max} el valor máximo de ΔT para un período de 10 días, que sucede en momentos de flujo de savia nulo. Las medidas se almacenaron en intervalos de 20 minutos en un Datalogger DL100. Para caracterizar cada individuo se consideraron los valores de densidad de flujo diaria ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$). La densidad de flujo media diaria para el rodal se estableció como la media aritmética de los valores de los 15 árboles monitorizados. Las medidas se realizaron desde el 19 de abril hasta el 9 de julio de 1997 (un total de 82 días).

Para la determinación de la transpiración es necesario el conocimiento del área conductora de los árboles monitorizados a la altura de las sondas (130 cm). Al ser individuos juveniles, el duramen no se había desarrollado, por lo que el área conductora se consideró como la sección interna del fuste (restando el espesor de la corteza) a 1,30 m, tomando como valor de estos el promedio de los valores presentados por el arbolado al inicio y al final del período de estudio (Tabla 1). No se consideró la existencia de variaciones radiales en el flujo de savia en especies de eucalipto (Hatton, et al., 1995; Zang et al., 1996; Medhurst, et al., 2002) debido a que el pequeño diámetro de los árboles monitorizados permitió que las sondas abarcasen prácticamente todo el radio interno del individuo.

Para obtener el valor de la transpiración anual se monitorizó la densidad de flujo de savia de cuatro de los 15 árboles durante un período más prolongado, del 19 de abril al 12 de octubre (un total de 177 días), utilizándose esta información como referencia para obtener el valor de transpiración media del conjunto de 16

individuos. Para el resto de los días del año se obtuvo la transpiración media mediante el uso de la relación calculada en este estudio entre la transpiración media diaria y los parámetros meteorológicos medidos diariamente.

Crecimiento y volumen de copa.

El crecimiento radial externo (mm) de cada árbol se midió mediante dos microdendrómetros radiales de tipo tornillo y placa situados en las caras norte y sur de cada árbol monitorizado. El valor de los dos microdendrómetros fue promediado para cada árbol en cada fecha de medida. Las medidas se realizaron en cinco fechas (14 mayo, 22 mayo, 12 junio, 26 junio y 9 de julio). La altura del arbolado se midió directamente en la guía terminal al inicio y al final del período de estudio. Se utilizó para ello una estructura metálica instalada en la masa para efectuar medidas ecofisiológicas. Dada la forma de la copa de los individuos de esta especie en esta etapa juvenil de desarrollo, se realizó una estimación del volumen de copa de cada árbol considerándola como un cilindro de diámetro similar al mayor ancho de copa de cada individuo (Tabla 1).

Biomasa y área foliar

El incremento en biomasa aérea total seca de los individuos monitorizados (fuste, ramas y hojas) durante el período de estudio, así como la determinación de la superficie foliar, se calcularon a partir de ecuaciones alométricas obtenidas en la misma área de estudio a partir de individuos de la misma especie y de dimensiones similares, considerando los valores dendrométricos de los árboles monitorizados al comienzo y al final del período de tiempo del estudio. La ecuación utilizada para la biomasa total fue la siguiente:

$$Biomasa\ total(g)=15,262 \cdot Dn^{1,521} \cdot h^{1,664}$$

$$(r^2=0,97; n=16) \quad [2]$$

Siendo Dn el diámetro normal (cm) y h la altura total (m) del arbolado.

La ecuación obtenida para la determinación del área foliar fue la siguiente:

$$Sup.\ foliar\ (cm^2)=1527.822 \cdot Dn^{1,4822} \cdot AC^{1,759}$$

$$(r^2=0,867; n=16) \quad [3]$$

Siendo Dn el diámetro normal (cm) y AC el ancho de copa (m) (Tabla 1).

Con el incremento de biomasa calculado para el período de estudio, y con el valor de transpiración, se estimó la eficiencia en el uso del agua (Water Use Efficiency) como la cantidad de materia seca producida por la planta por unidad de agua transpirada (Landsberg, 1999). En nuestro caso solo consideramos el incremento de biomasa aérea.

Parámetros meteorológicos

Una estación meteorológica situada en el área de estudio recogió los valores de precipitación, horas de sol, el recorrido del viento, temperatura y humedad relativa del aire. El valor de déficit de presión de vapor (DPV) medio diario se calculó a partir de

los correspondientes valores de temperatura y humedad relativa.

Análisis de datos

Para analizar la posible relación existente entre la densidad de flujo de savia medio diario y la transpiración media diaria, y los parámetros meteorológicos, se realizaron regresiones lineales múltiples paso a paso, seleccionando aquella que dio mejor ajuste. Con la finalidad de explorar posibles relaciones entre las características del arbolado (diámetro, área conductora, volumen de la copa y superficie foliar) y la transpiración, así como entre esta última y el crecimiento del arbolado (diámetro, altura y biomasa aérea), se realizaron regresiones simples.

RESULTADOS

La evolución temporal de la densidad de flujo media ($kg \cdot dm^{-2} \cdot día^{-1}$), junto con la precipitación se puede observar en la figura 1. La densidad de flujo media para el período de estudio fue de $7,91\ kg \cdot dm^{-2} \cdot día^{-1}$ (Tabla 2), oscilando entre 2,91 (4 de mayo) y $12,45\ kg \cdot dm^{-2} \cdot día^{-1}$ (5 de julio). A nivel individual, el valor máximo fue de $22,93\ kg \cdot dm^{-2} \cdot día^{-1}$ (22 de abril) y el mínimo de $0,47\ kg \cdot dm^{-2} \cdot día^{-1}$ (4 de mayo).

Tabla 2. Valores medios de densidad de flujo de savia media diaria (DFS), transpiración media diaria (T), crecimiento radial externo acumulado (CRE), crecimiento de altura acumulado (CA), incremento de biomasa seca diario (IB), y eficiencia de uso de agua (EUA) de los individuos monitorizados durante el período de estudio. Entre paréntesis: Error típico.

DFS ($kg \cdot dm^{-2} \cdot día^{-1}$)	T ($kg \cdot día^{-1}$)	CRE (mm)	CA (cm)	IB ($g \cdot día^{-1}$)	EUA (g/kg)
7,9052 (0,5254)	1,7778 (0,2681)	2,1960 (0,2581)	7,01 (0,28)	5,87 (1,10)	3,2699 (0,2673)

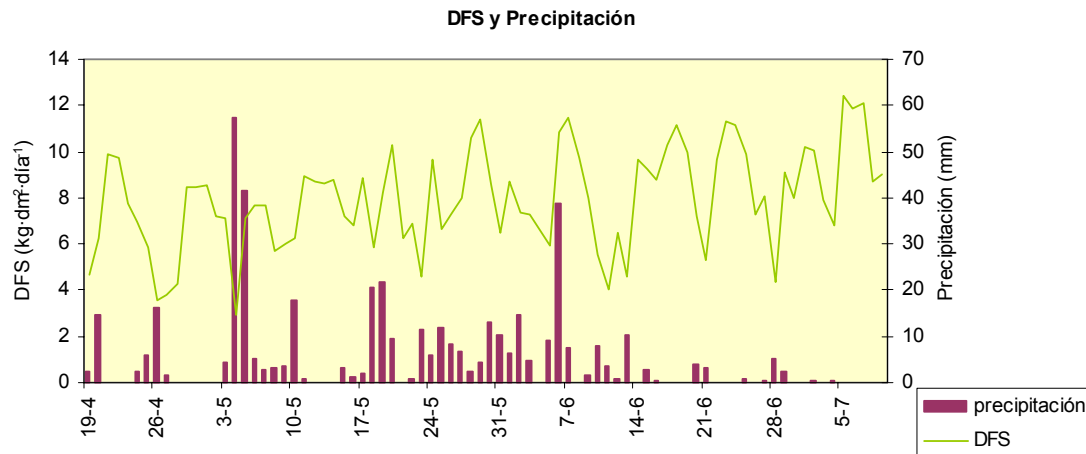


Figura 1. Evolución diaria de la densidad de flujo de savia media (DFS) y precipitación durante el período de estudio

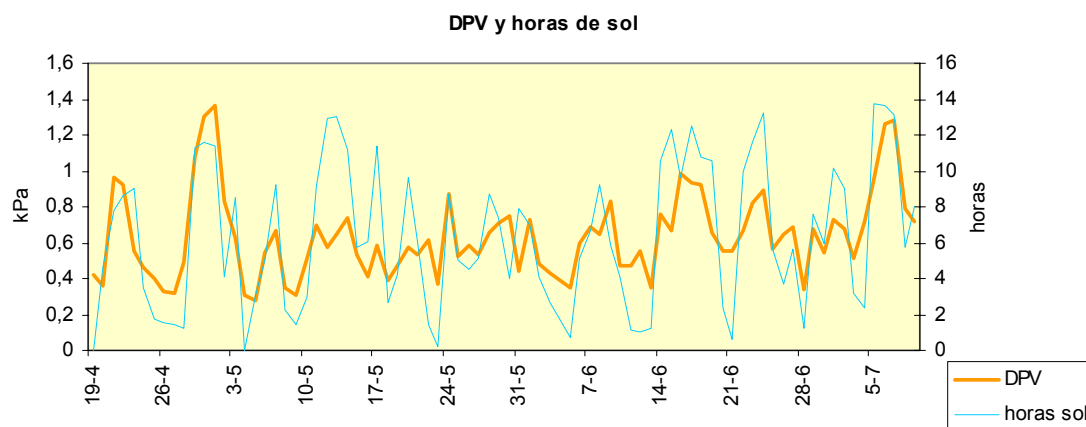


Figura 2. Evolución diaria del déficit de presión de vapor medio diario (DPV) y horas de sol durante el período de estudio

En las figuras 1 y 2 se puede apreciar la estrecha relación existente entre la densidad de flujo de savia diaria y algunos de los parámetros meteorológicos considerados. Se observan valores de flujo de savia más altos coincidiendo con los períodos de mayor DPV y horas de luz, y los valores más bajos, cuando disminuyen los valores de estos parámetros, lo que suele coincidir con intervalos de precipitaciones.

Las variables ambientales consideradas explicaron conjuntamente en gran medida

la variación en la densidad de flujo de savia media durante el período de estudio mediante regresión lineal múltiple. La ecuación obtenida fue ($r^2 = 0,779$; $n = 82$):

$$DFS = 0,094 + 0,275 \cdot HS + 14,647 \cdot DPV - 7,781 \cdot DPV^2 + 0,000000629 \cdot V^3 \quad [4]$$

Siendo DFS la densidad de flujo de savia media diaria del arbolado ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), HS las horas de sol diarias (horas), DPV la media del déficit de presión de vapor diario (kPa) y V el recorrido del viento medio diario (km).

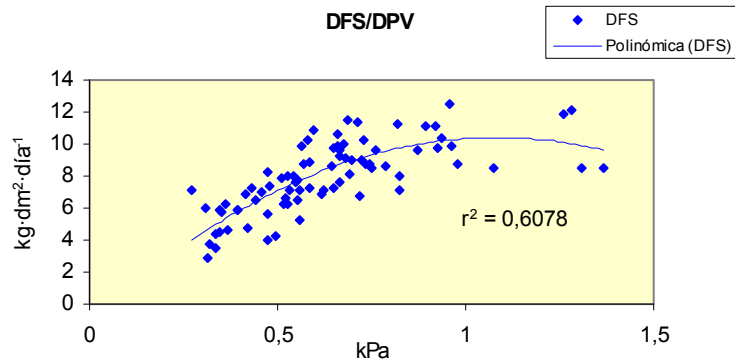


Figura 3. Relación entre la densidad de flujo de savia media diario (DFS) y déficit de presión de vapor (DPV) medio diario durante el período de estudio

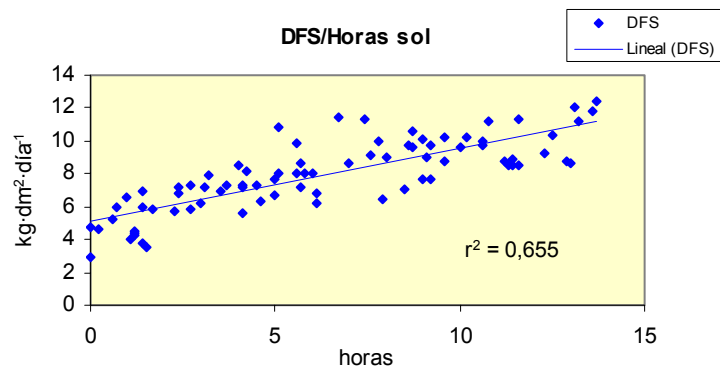


Figura 4. Relación entre la densidad de flujo de savia media diario (DFS) y las horas de sol durante el período de estudio

En las figuras 3 y 4 se representan las relaciones estadísticamente significativas ($p < 0,05$) existentes, por separado, entre los valores diarios de la densidad de flujo media, y el DPV diario y las horas de sol respectivamente.

La transpiración media estimada para el conjunto de árboles durante el período de estudio fue de $1,78 \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1}$ (Tabla 2), oscilando entre $0,62 \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1}$ (4 de mayo, con $0,31 \text{ kPa}$ de déficit de presión de vapor medio diario, 0 horas de sol, y $57,4 \text{ mm}$ de

precipitación) y $2,84 \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1}$ (5 de julio, con $0,96 \text{ kPa}$ de déficit de presión de vapor medio diario, $13,7$ horas de sol, y 0 mm de precipitación). El valor máximo observado a nivel individual fue de $7,72 \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1}$ y el mínimo de $0,05 \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1}$.

Al igual que en el caso de la densidad de flujo de savia, las variables ambientales analizadas explicaron en gran medida la variación de la transpiración media durante el período de estudio mediante regresión lineal múltiple.

La ecuación obtenida fue

($r^2 = 0,751$; $n = 82$):

$$T = -0,067 + 0,059 \cdot HS + 3,609 \cdot DPV - 1,926 \cdot DPV^2 + 0,000000128 \cdot V^3 \quad [5]$$

Siendo T la transpiración media diaria del arbolado ($\text{kg} \cdot \text{día}^{-1}$), HS las horas de sol diarias (horas) y DPV la media del déficit

de presión de vapor diario (kPa) y V el recorrido del viento medio diario (km). Se observaron relaciones significativas ($p < 0,05$) entre el diámetro, área conductora, volumen de copa aparente y superficie foliar estimada para cada individuo, y la transpiración media durante el período de estudio (Figuras 5, 6, 7, 8).

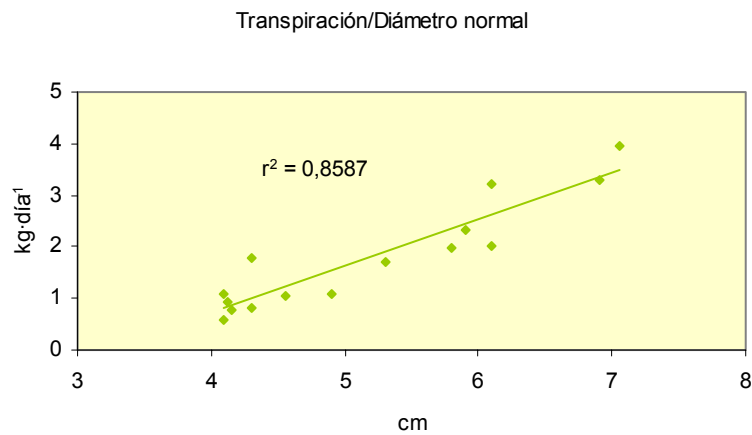


Figura 5. Relación entre transpiración media por individuo durante el período de estudio y diámetro normal.

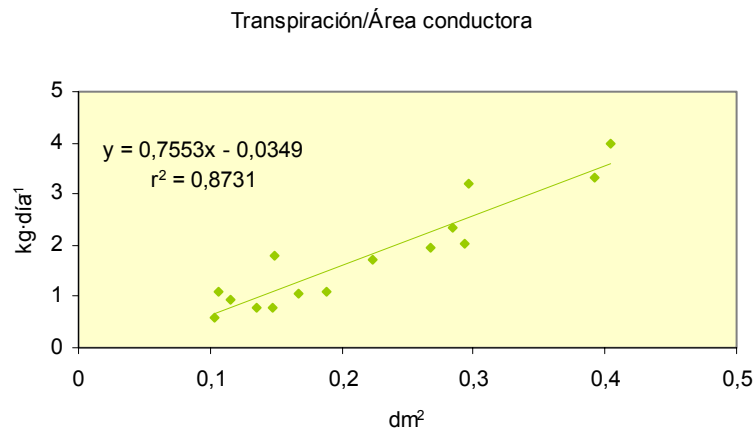


Figura 6. Relación entre transpiración media por individuo durante el período de estudio y área conductora

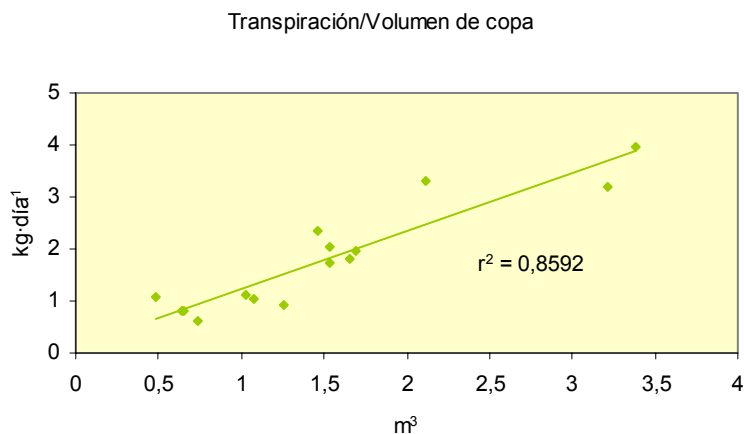


Figura 7. Relación entre transpiración media por individuo durante el período de estudio y volúmen de copa.

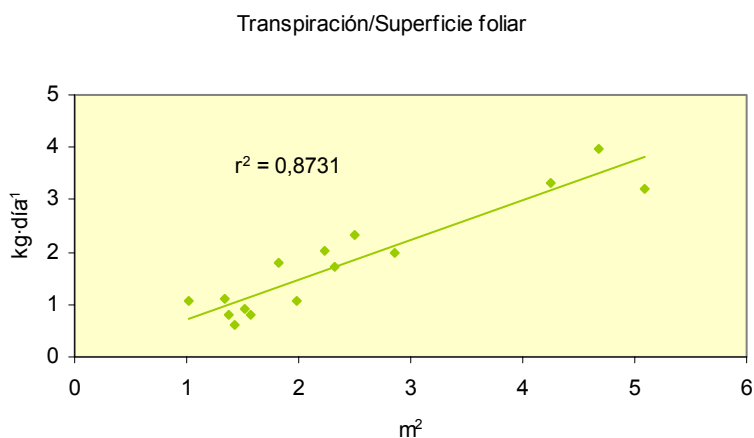


Figura 8. Relación entre transpiración media por individuo durante el período de estudio y superficie foliar.

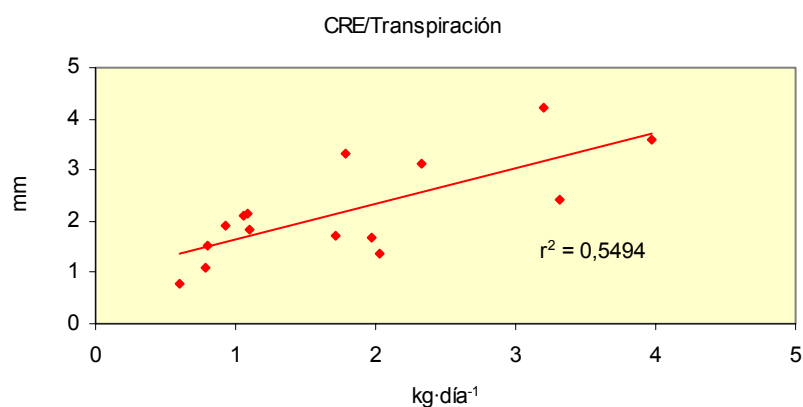


Figura 9. Relación entre crecimiento radial externo acumulado y transpiración media por individuo durante el período de estudio.

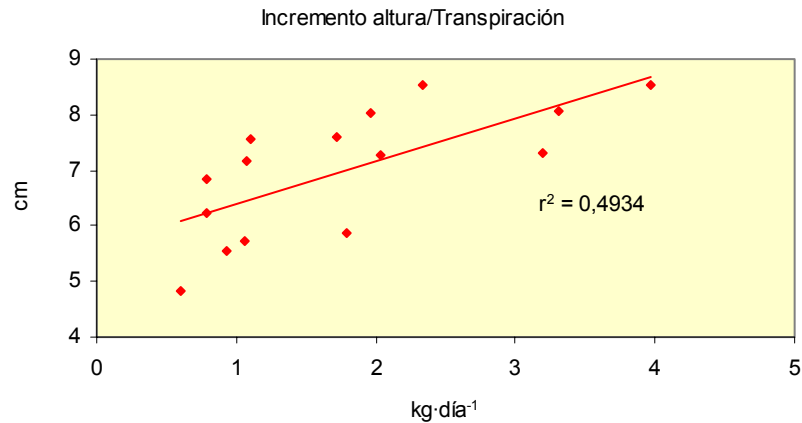


Figura 10. Relación entre crecimiento en altura acumulado y transpiración media por individuo durante el período de estudio.

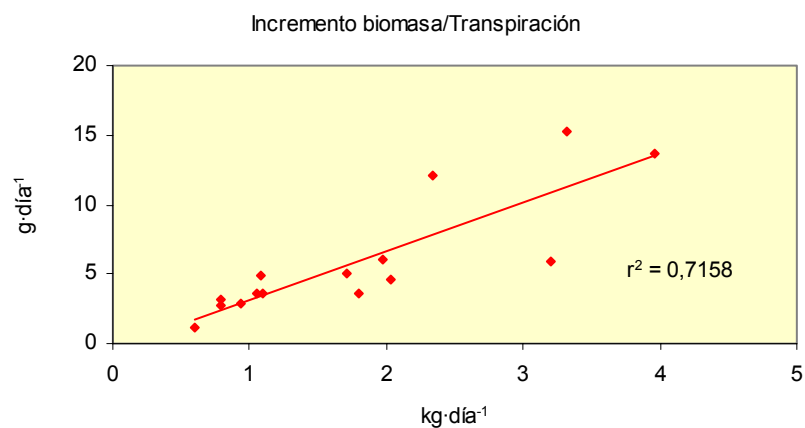


Figura 11. Relación entre incremento en biomasa aérea y transpiración media por individuo durante el período de estudio.

El crecimiento radial externo acumulado medio durante el período de estudio fue de 2,20 mm para el conjunto del arbolado (Tabla 2). El crecimiento en altura acumulado fue de 7,01 cm (Tabla 2). En las figuras 9 y 10 se muestra la relación positiva ($p < 0,05$) existente entre la transpiración media por individuo y su crecimiento radial y en altura acumulado durante el período de estudio.

También se observó una relación significativa ($p < 0,05$) entre la transpiración media diaria y el incremento medio de

biomasa aérea seca diario (Figura 11). El incremento de biomasa medio fue de 5,87 g diario durante el período de estudio (Tabla 2), lo que supuso una eficiencia media en el uso del agua (ratio entre incremento de biomasa y uso de agua) de 3,27 g de biomasa aérea por kg de agua transpirada (Tabla 2).

Mediante la relación existente entre la transpiración media de los 15 individuos monitorizados del 19 de abril al 9 de julio, y la transpiración de los cuatro individuos monitorizados para un período más

prolongado (del 19 de abril al 12 de octubre) (figura 12), y la aplicación de la relación observada entre la transpiración media y los parámetros ambientales (ecuación [5]) para los períodos de tiempo

comprendidos entre el 1 de enero – 18 de abril, y 13 de octubre – 31 de diciembre, obtuvimos un valor de transpiración media anual de $1,6051 \text{ kg} \cdot \text{día}^{-1}$.

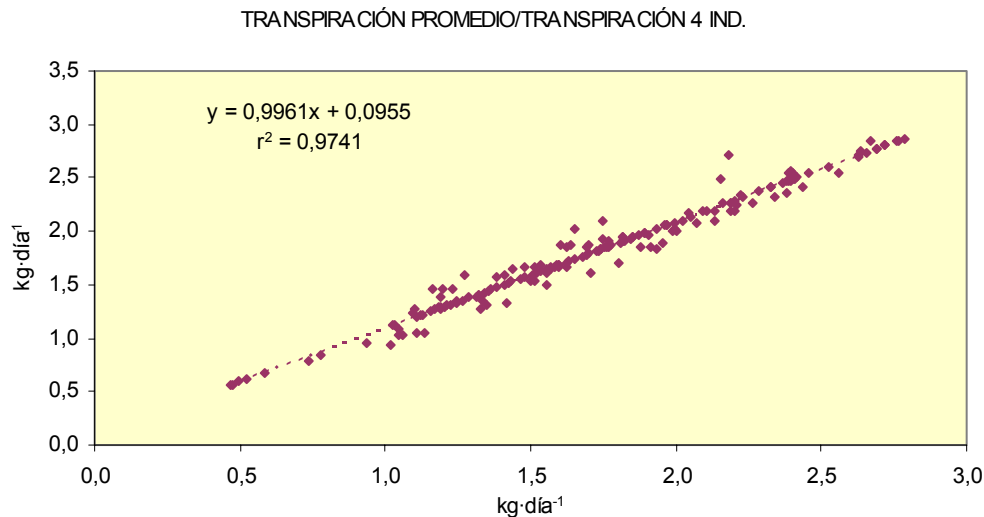


Figura 12. Relación entre la transpiración media de los 15 individuos monitorizados del 19 de abril - 9 de julio 1997, y la transpiración de los cuatro individuos monitorizados para un período más prolongado (19 abril-12 octubre 1997).

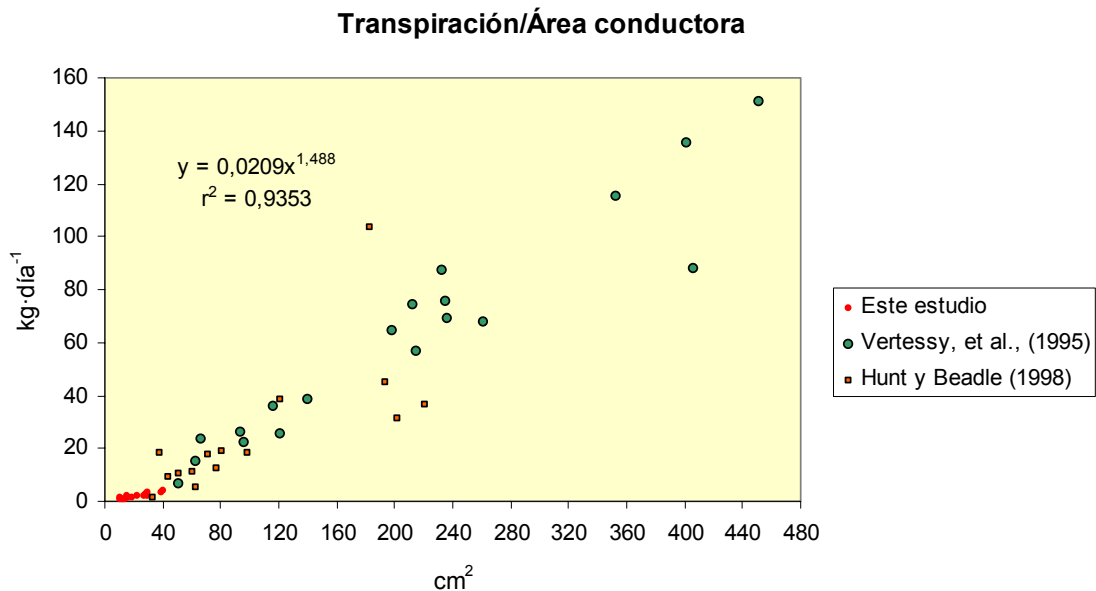


Figura 13. Comparación de la relación observada entre la transpiración y el área conductora entre nuestro estudio y los de Vertessy, et al., (1995) y Hunt y Beadle (1998).

DISCUSIÓN

Los valores de densidad de flujo de savia fueron superiores a los observados por Yin *et al.*, (2004) en una plantación de *E. urophylla* de 3 años de edad (entre 0,39 y 4,74 kg·dm⁻²·día⁻¹), y del mismo orden, aunque ligeramente inferiores, que los medidos por Hunt y Beadle (1998) en *E. nitens* (entre 7,96 y 54,64 kg·dm⁻²·día⁻¹ para árboles de ocho años y entre 4,15 y 47,51 kg·dm⁻²·día⁻¹ para individuos de 4 años), y Vertessy *et al.*, (1995) en una plantación de *E. regnans* de 15 años donde encontraron valores de densidad de flujo de savia entre 13,07 y 37,51 kg·dm⁻²·día⁻¹. Los valores de transpiración diaria obtenidos son del mismo orden que los observados por Calder *et al.*, (1992) en *E. tereticornis* y *E. camaldulensis* de 2 y 3 años de edad de diámetros parecidos presentando valores entre 3,42 y 5,82 kg·día⁻¹, y considerablemente inferiores a los encontrados por Vertessy *et al.*, (1995) en una plantación de *E. regnans* de 15 años, con cifras entre 6,6 y 150,6 kg·día⁻¹, por Hunt y Beadle (1998) en plantaciones *E. nitens* de 4 años con tasas de transpiración entre 1,4 y 18,15 kg·día⁻¹ y 8 años (entre 5,01 y 103,57 kg·día⁻¹), por Medhurst *et al.*, (2002) en una plantación de 8 años de *E. nitens* con valores entre 33 y 60 kg·día⁻¹, y por Fetene y Beck (2004) en una plantación de *E. globulus* presentando un valor medio de 45 kg·día⁻¹. Los bajos valores de transpiración de nuestro estudio pueden deberse al menor tamaño de los árboles monitorizados, con muy baja área conductora, inferior en la mayoría de los casos a los 40 cm² (figura 13).

La estrecha relación observada entre densidad de flujo de savia/transpiración y los parámetros meteorológicos confirma lo encontrado por otros autores en diferentes

especies de eucalipto (Dye, 1996; Myers *et al.*, 1998; Medhurst *et al.*, 2002; Almeida *et al.*, 2004; Fetene y Beck, 2004; Stape *et al.*, 2004; Yin *et al.*, 2004; Zeppel *et al.*, 2004; Engel *et al.*, 2005), extendiendo nuestros resultados esos hallazgos para masas juveniles de *E. globulus*. La relación polinómica de segundo orden existente entre la densidad de flujo de savia/transpiración y el DPV ha sido observada por otros autores en diferentes especies (Oren *et al.*, 1999; Oren y Pataki, 2001; Fetene y Beck, 2004), así como la saturación de la densidad de flujo de savia a altos valores de DPV, habiendo sido atribuida a limitaciones estomáticas a la transpiración, para evitar fenómenos de cavitación (Oren *et al.*, 1999; Oren y Pataki, 2001; Ewers *et al.*, 2002; Fetene y Beck, 2004; Yin *et al.*, 2004), o a un descenso en el contenido de humedad en el suelo cercano a las raíces, debido a un elevado flujo de savia (Pataki *et al.*, 1998, 2000). Pereira *et al.*, (1986) observaron que *E. globulus* era muy efectivo controlando la pérdida de agua cuando la demanda evaporativa del aire era muy alta, mostrando durante el verano el máximo nivel de transpiración antes de que se alcanzase el máximo valor de déficit de presión de vapor. La existencia de una relación lineal entre radiación (horas de sol) y densidad de flujo de savia confirma lo hallado en diferentes especies (Oren y Pataki, 2001; Yin *et al.*, 2004; Engel *et al.*, 2005). La relación positiva observada entre la densidad de flujo de savia/transpiración y el viento, parece deberse a que este elimina el aire saturado situado en la superficie de la hoja, reemplazándolo por otro más seco, incrementando así el gradiente de potencial hídrico, lo que da lugar a una mayor transpiración (Davies *et al.*, 1974). Este hecho ha sido descrito en diferentes

especies del género *Eucalyptus* (Taylor *et al.*, 2001; Yin *et al.*, 2004).

Existen diversos estudios que documentan para diferentes especies del género *Eucalyptus*, una alta relación entre diferentes parámetros alométricos (diámetro normal, área conductora, volumen de copa y superficie foliar) y la transpiración (Calder *et al.*, 1992; Hatton y Wu, 1995; Hatton *et al.*, 1995; Vertessy *et al.*, 1995, 1997; Hunt y Beadle, 1998; O'Grady *et al.*, 1999; Pita *et al.*, 2003). En nuestro caso, el que las relaciones existentes entre estos parámetros alométricos y transpiración sean lineales, parece indicar una ausencia de limitaciones hídricas en el área de estudio, ya que se ha observado que esa relación se va transformando en no lineal durante periodos de escasez hídrica, con los individuos mayores transpirando proporcionalmente menos que los menores (Hatton y Wu, 1995).

Estas relaciones permiten estimar valores de transpiración a nivel de masa forestal o cuenca hidrológica, a partir de mediciones puntuales de densidad de flujo de savia en un determinado número de individuos (Hatton *et al.*, 1995; Vertessy *et al.*, 1995, 1997; Hunt y Beadle, 1998; Wullschleger *et al.*, 2001). En una cuenca hidrológica de eucalipto cercana a la zona de estudio, con una precipitación media de 2.157 mm, un arbolado de un diámetro medio de 14,2 cm, y una densidad de 1.400 pies/ha (Gras, 1993), se realizó un balance hídrico (Fernández, 2002), obteniéndose un consumo medio anual para años sin perturbación de 915 mm. Considerando las pérdidas debidas a la interceptación del eucalipto por ese área (14,3% de la precipitación – Gras, 1993 -), y asumiendo un consumo debido al matorral y a la evaporación del suelo y hojarasca del orden del 3,75% y 10% del consumo total respectivamente (Vertessy *et al.*, 1998), el

consumo debido al arbolado podría estar entorno a 437 mm. Con las relaciones obtenidas en nuestro estudio, un individuo de 14,2 cm de diámetro normal presentaría una transpiración media de 9,998 kg·día⁻¹ para el período de estudio, y de 9,027 kg·día⁻¹ para todo el año, lo que supondría para una masa de las mismas características que las de la cuenca de eucalipto citada, una transpiración anual de 460 mm, cifra algo superior a la calculada mediante el balance hidrológico, aunque muy similar. Esto supondría un 50,3% del consumo total de la cuenca, siendo este un valor ligeramente inferior al observado por Vertessy *et al.*, (1998) en una cuenca de *Eucalyptus regnans* de 15 años en Australia (56,7% de un consumo total de 1340 mm), y muy parecido al observado por Wilson *et al.* (2001) en una cuenca mixta de frondosas en el sur de Estados Unidos (50% de 571 mm). A pesar de la obtención de resultados parecidos mediante monitorización de flujo de savia y el balance hidrológico de la cuenca, la extrapolación del uso de agua de unos individuos determinados a toda una cuenca debe hacerse de manera cuidadosa, teniendo en cuenta la heterogeneidad de la estructura y composición de la vegetación en el área analizada (Li y Avisar, 1995), así como el impacto de estas variaciones estructurales en las interrelaciones existentes entre la superficie de la tierra y la atmósfera (Avisar, 1995).

La relación positiva existente entre el crecimiento e incremento de biomasa del arbolado y la transpiración podría reflejar que tanto el crecimiento del arbolado como la cantidad de agua transpirada depende de la superficie foliar del arbolado en ausencia de limitaciones hídricas (Figuras 11 y 14), ya que la cantidad de follaje determina el nivel de transpiración, y por tanto la tasa fotosintética del dosel (Bréda y Granier, 1996). Por otro lado, explicaría la acusada influencia negativa en el crecimiento, de

plagas como la del defoliador *Gonipterus scutellatus* (Mansilla, 2002; Cordero y Santolamazza, 2000), y del chamuscado de copas producido por incendios (Vega *et al.*, 2006). De cara a una estimación del impacto de plagas como la citada en el crecimiento de *E. globulus*, una evaluación de la superficie foliar podría ser usada como un buen indicador. La escasez de información sobre la relación existente entre transpiración y crecimiento del arbolado ha sido señalada por diversos autores (Bréda y Granier, 1996; Simpson, 2000; Welander y Ottosson, 2000; Zweifel *et al.*, 2006). Los valores de eficiencia de uso de agua obtenidos se encuentran dentro del rango ($1 - 5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de agua transpirada) observado por Dye (2000) en *Eucalyptus nitens*, siendo muy similar al encontrado por Stape *et al.*, (2004) en plantaciones de

Eucalyptus grandis x *urophylla* ($3,21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). La eficiencia del uso de agua encontrada es muy similar a los valores de $3,3 - 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ observados en especies de los géneros *Pinus* y *Larix* (Landsberg, 1999), así como a la observada para *Pinus pinaster* a partir de isótopos de C_{13} por Guelh *et al.*, (1994), con un valor de $4,3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, y ligeramente superior a los encontrados en especies del género *Quercus* con valores entre $2,5 - 2,9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cermák *et al.*, 1991; Jorgensen y Schelde, 2001). Sin embargo, estos valores resultan inferiores a los presentados por otras especies de crecimiento rápido, como las pertenecientes a los géneros *Salix*, *Betula* y *Alnus*, con valores oscilando los $4,8 - 6,3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de agua transpirada (Lindroth y Cienciala, 1998; Jorgensen y Schelde, 2001).

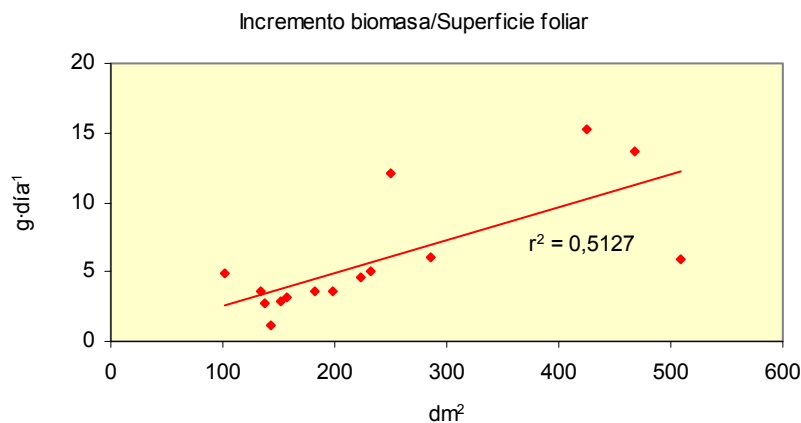


Figura 14. Relación entre incremento en biomasa aérea y superficie foliar durante el período de estudio

CONCLUSIONES

En este estudio se ha observado que, en un período de aparente ausencia de limitaciones de humedad edáfica, la transpiración de *Eucalyptus globulus* está claramente influenciada por las horas de sol, el déficit de presión de vapor y la presencia de viento. Parece, por lo tanto que, actuaciones que favorezcan una mayor exposición de las copas (clareos, podas), redundarían en un incremento de la densidad de flujo de savia, siempre que ello no supusiese una disminución significativa del contenido de humedad del suelo, debido al aumento de la evaporación desde este, al incidir mayor radiación sobre el suelo. En principio ello favorecería el crecimiento y la acumulación de biomasa del arbolado, ya que hemos observado una relación positiva entre la transpiración y estas variables. Este tratamiento podría ser de interés en una silvicultura que buscase más el desarrollo

de los individuos, que la producción por hectárea, y tendría sentido en la búsqueda de nuevos mercados de los productos de esta especie. En ese contexto es posible, que el consumo total de agua por hectárea disminuya, lo mismo que la extracción de nutrientes en la corteza. Las cifras de transpiración para *E. globulus* obtenidas mediante la técnica de densidad de flujo de savia parecen bastante concordantes con las halladas mediante el balance hidrológico a nivel de cuenca, lo que refleja la gran utilidad de esta técnica a la hora de evaluar la contribución del arbolado en los balances hídricos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado con el proyecto INIA SC96-034-C2-1. Los autores agradecen a Antonio Arellano y José Ramón González su inestimable ayuda en el trabajo de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A.P., Riekerk, H., 1990. Water balance of *Eucalyptus globulus* and *Quercus suber* forest stands in south Portugal. *For. Ecol. Manage.*, 38: 55-64.
- Almeida, A.C., Landsberg, J.J., Sands, P.J., Ambrogi, M.S., Fonseca, S., Barddal, S.M., Betolucci, F.L., 2004. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. *For. Ecol. Manage.*, 193: 167-177.
- Avisar, R., 1995. Scaling of land-atmosphere interactions: an atmospheric modelling perspective. *Hydrol. Processes* 9: 679-695.
- Bará, S.; Rigueiro, A., Gil, M.C., Mansilla, P., Alonso, M., 1985. Efectos ecológicos del *Eucalyptus globulus* en Galicia. Estudio comparativo con *Pinus pinaster* y *Quercus robur*. INIA. 357 p.
- Bréda, N.; Granier, A., 1996. Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Ann. Sci. For.*, 53: 521-536.
- Bréda, N.; Granier, A.; Aussenac, G., 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiol.*, 15: 295-306.
- Calder, I.R., 1992. Water use of eucalypts – a review. En: *Growth and Water Use of Forest Plantations*. Calder, I.R., Hall, R.L., Adlar, P.G. (eds). John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Inglaterra, pp: 167-179.
- Calder, I.R., Swaminath, M.H., Kariyappa, G.S., Srinivasalu, N.V., Srinivasa Murthy, K.V., Mumtaz, J., 1992. Measurements of transpiration from *Eucalyptus* plantations, India, using deuterium tracing. En: *Growth and Water Use of Forest Plantations*. Calder, I.R., Hall, R.L., Adlar, P.G. (eds). John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Inglaterra, pp: 196-215.
- Calder, I.R., Hall, R.L., Prasanna, K.T., 1993. Hydrologic impact of *Eucalyptus* plantation in India. *J. Hydrol.*, 150: 249-256.
- Calvo De Anta, R., 1992. El eucalipto en Galicia: Sus relaciones con el medio natural. Universidad de Santiago de Compostela.
- Cermák, J., Kucera, J., Stepankova, M., 1991. Water consumption of full-grown oak (*Quercus robur* L.) in a floodplain forest after the secession of flooding. En: *Floodplain Forest Ecosystem*. Vol. II, Penka, M., Vyskoti, M., Klimo, E., Vasicek, F. (eds.), Nueva York, pp: 397-417.
- Cordero, A., Santolamazza, S., 2000. The effect of three species of *Eucalyptus* on growth and fecundity of the *Eucalyptus* Snout Beetle (*Gonipterus scutellatus*, Coleoptera, Curculionidae). *Forestry* 73: 21-29.
- Cornish, P.M., Vertessy, R.A., 2001. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest. *J. Hydrol.*, 242: 43-63.
- David, T.S., Ferreira, M.I., David, J.S., Pereira, J.S., 1997. Transpiration from a mature *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. *Oecologia* 110: 153-159.
- Davies, W.J., Kozlowski, T.T., Pereira, J., 1974. Effect of wind on transpiration and stomatal aperture of woody plants. En: *Mechanisms of Regulation of Plant Growth*. Bieleski, R.L., Ferguson, A.R., Cresswell, M.M. (eds.), Bull. Roy. Soc. New Zealand.
- Díaz-Fierros, F., Calvo, R., Paz, A., 1982. As especies forestais e solos de Galicia. Cuad. Area de Cien. Agrarias Sem. Estud. Galegos.

- Dunn, G.M., Connor, D.J., 1993. An analysis of sapflow on mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forests of different age. *Tree Physiol.*, 13: 321-336.
- Dye, P.J., 1996. Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. *Tree Physiol.*, 16: 233-238.
- Dye, P.J., 2000. Water use efficiency in South African *Eucalyptus* plantations: a review. *S. Afr. For. J.*, 189: 17-26.
- Engel, V., Jobbágy, E.G., Stieglitz, M., Williams, M., Jackson, R.B., 2005. Hydrological consequences of *Eucalyptus* afforestation in the Argentine Pampas. *Water Resources Research*, Vol. 41. 14 pp.
- Farley, K.A., Jobbágy, E.C., Jackson, R.B., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11: 1565-1576.
- Fernández, C., 2002. Influencia de actuaciones selvícolas y perturbaciones en el balance hídrico y dinámica de nutrientes en cuencas experimentales. Su conexión con la sostenibilidad de la silvicultura intensiva en especies forestales de crecimiento rápido. Tesis Doctoral. Universidad de Vigo.
- Fernández, C., Vega, J.A., Gras, J.M., Fonturbel, T., 2006. Changes in water yield alter a sequence of perturbations and forest management practices in an *Eucalyptus globulus* Labill. watershed in Northern Spain. *For. Ecol. Manage.* (en prensa).
- Fetene, M., Beck, E.H., 2004. Water relation of indigenous versus exotic tree species, growing at the same site in a tropical montane forest in southern Ethiopia. *Trees* 18: 428-435.
- Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 42: 193-200.
- Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.*, 3: 309-320.
- Granier, A., Biron, P., Lemoine, D., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agric. For. Meteorol.*, 100: 291-308.
- Gras, J.M., 1993. Investigación sobre las relaciones hídricas de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Madrid.
- Gras, J.M., Vega, J.A., Bará, S., 1993. Six year of study on fast growing forest plantations catchments in northwest Spain. *Acta Geol. Hispanica* 28 (2-3): 111-117.
- Greenwood, E.A.N., 1992. Water use by eucalypts – measurement and implications for Australia and India. En: *Growth and Water Use of Forest Plantations*. Calder, I.R., Hall, R.L., Adlar, P.G. (eds). John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Inglaterra, pp: 298-300.
- Guelh, J.M., Picón, C., Aussenca, G., Gros, P., 1994. Interactive effects of elevated CO₂ and soil drought on growth and transpiration efficiency and its determinants in two European tree species. *Tree Physiol.*, 14: 707-724.
- Gyenge, J.E., Fernández, M.E., Schlichter, T.M., 2003. Water relations of ponderosa pines in Patagonia Argentina: implications for local water resources and individual growth. *Trees* 17: 417-423.
- Hatton, T.J., Wu, H.I., 1995. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use. *Hydrol. Processes* 9: 527-540.
- Hatton, T.J., Moore, S.J., Reece, P.H., 1995. Estimating stand transpiration in *Eucalyptus populnea* woodland with the heat pulse method: measurement errors and sampling strategies. *Tree Physiol.*, 15: 219-227.

- Hunt, M.A., Beadle, C.L., 1998. Whole-tree transpiration and water-use partitioning between *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* weeds in a short-rotation plantation in northeastern Tasmania. *Tree Physiol.*, 18: 557-563.
- Jorgensen, U., Schelde, K., 2001. Energy crop water and nutrient use efficiency. The International Energy Agency IEA Bioenergy, Task 17, Short Rotation Crops. Dinamarca. 38 pp.
- Landsberg, J.J., 1999. Relationships between water use efficiency and tree production. En: *The Way Trees Use Water*. Landsberg, J.J. (ed). ACT, Rural Industries Research and Development Corporation, Barton, pp: 54-65.
- Li, B., Avisar, R., 1994. The impact of spatial variability of land surface characteristics on land surface heat fluxes. *J. Climate* 7: 527-537.
- Lindroth, A., Cienciala, E., 1996. Water use efficiency of short-rotation *Salix viminalis* at leaf, tree and stand scales. *Tree Physiol.*, 16: 257-262.
- Lüttschwager, D., Rust, S., Wulf, M., Forkert, J., Hüttel, R.F., 1999. Tree canopy and herb layer transpiration in three Scots pine with different stand structures. *Ann. For. Sci.* 56: 265-274.
- Macías, F., Calvo, R., 2001. Atlas de Galicia: Los suelos. Xunta de Galicia. Consellería de Presidencia.
- Mansilla, P., 2002. Problemas fitosanitarios presentes y futuros del eucalipto en Galicia. En: *Actas del Simposio Internacional sobre Socioeconomía, Patología, Tecnología y Sostenibilidad del Eucalipto*. Vigo, pp. 95-98.
- Martin, T.A., Brown, K.J., Cermák, J., Ceulemans, R., Kucera, J., Meinzer, F.C., Rombold, J.S., Sprugel, D.G., Hinckley, T.M., 1996. Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis* forest. *Can. J. For. Res.*, 27: 797-808.
- Medhurst, J.L., Battaglia, M., Beadle, C.L., 2002. Measured and predicted changes in tree and stand water use following high-intensity thinning of a 8-year-old *Eucalyptus nitens* plantation. *Tree Physiol.*, 22: 775-784.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2000. Tercer Inventario Forestal Nacional. 1997-2006: Galicia. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- Myers, B.J., Benyon, R.G., Theiveyanathan, S., Criddle, R.S., Smith, C.J., Falkner, R.A., 1998. Response of effluent-irrigated *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* to salinity and vapour pressure deficits. *Tree Physiol.*, 18: 565-573.
- Nielson, D., 2000. The global eucalyptus resource and some solidwood-panel product development issues. En: *The Future of Eucalyptus for Wood Products*. IUFRO Conference, Launceston, Australia.
- O'Grady, A.P., Eamus, D., Hutley, L.B., 1999. Transpiration increases during the dry season: patterns of tree water use in eucalypt open-forests of northern Australia. *Tree Physiol.*, 19: 591-597.
- Oren, R., Pataki, D.E., 2001. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. *Oecologia* 127: 549-559.
- Oren, R., Phillips, N., Ewers, B.E., Pataki, D.E., Megonigal, J.P., 1999. Sap-flux scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. *Tree Physiol.*, 19: 337-347.
- Pataki, D.E., Oren, R., Phillips, N., 1998. Response of sap flux and stomatal conductance of *Pinus taeda* L. trees to stepwise reductions in leaf area. *J. Exp. Bot.*, 49: 871-878.
- Pataki, D.E., Oren, R., Smith, W.K., 2000. Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought. *Ecology* 81: 2557-2566.

- Pereira, J.S., Tenhunen, J.D., Lange, O.L., Beyschlag, W., Meyer, A., David, M.M., 1986. Seasonal and diurnal patterns in leaf gas exchange of *Eucalyptus globulus* trees growing in Portugal. *Can. J. For. Res.*, 16: 177-184.
- Pita, P., Gascó, A., Pardos, J.A., 2003. Xylem cavitation, leaf growth and leaf water potential in *Eucalyptus globulus* clones under well-watered and drought conditions. *Funct. Plant Biol.*, 30: 891-899.
- Simpson, D.G., 2000. Water use of interior Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 30: 534-547.
- Soares, J.V., Almeida, A.C., 2001. Modeling the water balance of soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. *J. Hydrol.*, 253: 130-147.
- Soto, B., Brea, M.A., Pérez, R., Díaz-Fierros, F., 2005. Influence of 7-year-old *Eucalyptus globulus* plantation in the low flow of a small basin. En: *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*. July 11-14 2005. Guimaraes, Portugal.
- Stape, J.L., Binkley, D., Ryan, M.G., 2004. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *For. Ecol. Manage.*, 193: 17-31.
- Taylor, P.J., Nuberg, I.K., Hatton, T.J., 2001. Enhanced transpiration in response to wind effects at the edge of a blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation. *Tree Physiol.*, 21: 403-408.
- Vega, J.A., Jiménez, E., Bará, S., Pérez-Gorostiaga, P., Alonso, M., Cuiñas, P., Fonturbel, T., Rozados, M.J., Fernández, C., 2006. Localized heat injury on crown and trunk of *Eucalyptus globulus*: relationships between growth, physiological and bioelectrical parameters. En: *V International Conference on Forest Fire Research*, Viegas, D.X. (ed), Coimbra, 9 pp.
- Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K., Gribben, P.R., 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiol.*, 15: 559-567.
- Vertessy, R.A., Hatton, T.J., Reece, P., O'Sullivan, S.K., Benyon, R.G., 1997. Estimating stand water use of a large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique. *Tree Physiol.*, 17: 747-756.
- Vertessy, R.A., Watson, F., O'Sullivan, S., David, S., Campbell, R., Benyon, R., Haydon, S., 1998. Predicting water yield from mountain ash forest catchments. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Industry Report 98/4. 38 pp.
- Welander, N.T., Ottosson, B., 2000. The influence of low light, drought and fertilization on transpiration and growth in young seedlings of *Quercus robur* L. *For. Ecol. Manage.*, 127: 139-151.
- Wilson, K.B., Hanson, P.J., Mulholland, P.J., Baldocchi, D.D., Wullshleger, S.D., 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agric. For. Meteorol.*, 106: 153-168.
- Wullshleger, S.D., Hanson, P.J., Todd, D.E., 2001. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *For. Ecol. Manage.*, 143: 205-213.
- Yin, G., Zhou, G., Morris, J., Huang, Z., Chu, G., Zhou, G., 2004. Sap flow of *Eucalyptus* (*Eucalyptus urophylla*) to environmental stress in South China. *J. Zhejiang Univ. SCI* 5: 1218-1225.

- Zang, D., Beadle, C.L., White, D.A., 1996. Variation of sapflow velocity in *Eucalyptus globulus* with position in sapwood and use of a correction coefficient. *Tree Physiol.*, 16: 697-703.
- Zeppel, M.J.B., Murray, B.R., Barton, C., Eamus, D., 2004. Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia. *Funct. Plant Biol.*, 31: 461–470.
- Zweifel, R., Zimmermann, L., Zeugin, F., Newbery, D.M., 2006. Intra-annual radial growth and water relations of trees: implications towards a growth mechanism. *J. Exp. Bot.*, 57: 1445-1459.