

III Reunión conjunta del Grupo de Trabajo de Repoblaciones Forestales (SECF)
y el Grupo de Trabajo de Restauración Forestal (AEET)

Efecto del riego y la fertilización en el crecimiento de *Eucalyptus x urograndis* como cultivo energético en Huelva

Fernández Martínez, M.^{1*}, Alaejos Gutiérrez, J.¹, Andivia Muñoz, E.^{1,2},
García Albalá, J.¹, Tapias Martín, R.¹

¹ Universidad de Huelva. Dpto. de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería,
Campus La Rábida S/N, 21819, Palos de La Frontera (Huelva)

² Universidad de Alcalá de Henares. Dpto. de Ciencias de la Vida. Campus Universitario. Autovía A2, km 33.6,
28871, Alcalá de Henares (Madrid)

*Autor para correspondencia: manuel.fernandez@dcaf.uhu.es

Resumen

En un terreno de suelo franco-arenoso, bajo clima mediterráneo con influencia atlántica, se estudió, durante dos años, la producción de biomasa de un clon de *Eucalyptus x urograndis*, cultivado a una densidad de 2500 pies ha⁻¹. Partiendo de plantas de un año de edad, de diámetro 63.4 ± 8 mm y altura 4.6 ± 0.5 m, en un diseño factorial completo, se aplicaron 12 tratamientos de cultivo con cuatro niveles de riego (R0: control sin regar; R1: 325 mm; R2: 646 mm; R4: 1298 mm) y tres de fertilización (F0: control sin fertilizar; F1: 150 kg ha⁻¹ de N; F2: 300 kg ha⁻¹ de N). El riego se aplicó cada año de abril a septiembre y la fertilización en equilibrio 16-8-12. La precipitación anual de cada año fue 510 mm y 326 mm, respectivamente. Se llevó un seguimiento del crecimiento en altura (H) y diámetro (D) y se establecieron ecuaciones alométricas para relacionarlos con la biomasa seca aérea. La producción de biomasa seca aérea mostró diferencias significativas entre riegos ($p < 0.001$) y fertilizaciones ($p < 0.001$), pero no para la interacción riego x fertilización ($p = 0.134$). Los incrementos de biomasa se movieron en un rango de 20.6 t ha⁻¹ año⁻¹ para R0F0 a 55.4 t ha⁻¹ año⁻¹ para R4F2. La combinación de riego y fertilización tuvo efecto sinérgico aumentando la eficiencia en el uso de los recursos de las plantas. Estos datos pueden ayudar a ajustar las dosis óptimas de riego y fertilización en las plantaciones.

Palabras clave: alometría, biomasa, cultivo lignocelulósico, producción vegetal.

1. Introducción

El género *Eucalyptus* proporciona la mayor parte de las especies arbóreas utilizadas en plantaciones comerciales por todo el mundo para la producción de biomasa, con cerca de 15×10^6 ha (Beadle and Sands, 2004), principalmente destinadas a pasta para papel y, más recientemente, a uso energético (Bouvet *et al.*, 2013). En España ocupa más de 6×10^5 ha, principalmente en el Norte, Noroeste, Andalucía Occidental y Extremadura. Ello supone algo más del 3.7 % de la superficie forestal arbolada del territorio español (Ruiz *et al.*, 2008) pero produce casi el 40 % de la biomasa leñosa cosecha. Los principales limitantes del desarrollo de las plantaciones suelen ser el estrés hídrico, la falta de fertilidad de los suelos y las heladas invernales (Almeida *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2007; Stape *et al.*, 2004).

En ambiente de clima mediterráneo, la sequía estival condiciona el crecimiento de las plantas, de tal forma que, en condiciones de secano, el crecimiento queda claramente comprometido durante la época más seca, debido al estrés hídrico sufrido por éstas (Zeppel *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2010). Una de las variables más limitantes en el crecimiento diametral diario de las plantaciones es la humedad edáfica, especialmente durante el verano, pero también gran parte de la primavera y el otoño. Esta limitación impuesta por factores ambientales se traduce en una pérdida de crecimiento tal que sería necesaria la aportación de riego, al menos durante cinco meses desde mayo hasta septiembre, si se quiere alcanzar la máxima potencialidad de crecimiento de las plantas (Fernández *et al.*, 2012). Asimismo, la escasa fertilidad de los suelos forestales donde se implantan las plantaciones, hace necesaria la aplicación de nutrientes minerales, en varias ocasiones durante el cultivo, para lograr los objetivos de producción deseados, no solo por mejorar la producción absoluta sino por incrementar también la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes (Smethurst *et al.*, 2003; Smethurst *et al.*, 2004; Stape *et al.*, 2004; Whitehead and Beadle, 2004). Por tanto, la diversidad de ambientes y la necesidad de mejorar las producciones hace que se desarrollen, no solo programas para mejorar los tratamientos silvícolas antes mencionados (riego, fertilización), sino también de selección y mejora genética que generen nuevos taxones (especies, clones, híbridos). Dichos taxones deben ser evaluados para analizar su capacidad de adaptación y su potencial productivo (Pita *et al.*, 2003; Pallet and Sale, 2004; Ruiz *et al.*, 2008; Bouvet *et al.*, 2013).

Por todo ello, como principal objetivo de este estudio, se plantea evaluar la producción de biomasa de un clon de *Eucalyptus x urograndis* bajo distintos regímenes de disponibilidad hídrica y nutricional en ambiente mediterráneo, tratado a turno corto (tres años), con fines energéticos. Este híbrido, procedente de cruzamiento de *E. grandis* y *E. urophylla* presenta altos rendimientos en biomasa pero suele ser exigente en humedad y nutrición mineral.

2. Material y métodos

El 15 de abril de 2011 se plantaron en campo plantas de vivero de 25-30 cm de al-

tura de un clon de *Eucalyptus x urograndis* siguiendo líneas paralelas. La separación entre líneas fue de 4 m y la distancia entre plantas dentro de la línea de 1 m (esto es, 4 x 1 m², 2500 plantas ha⁻¹). La preparación del terreno consistió en un subsolado lineal y posterior labor de refino de la línea de plantación con tractor agrícola. Se aplicó un herbicida de preemergencia antes de la plantación y una aplicación de postemergencia a los tres meses. En las líneas de plantación se instaló un sistema de riego por goteo, con goteros de 1.6 L h⁻¹ y separados 0.6 m entre sí. Para prevenir la mortalidad por estrés hídrico se aplicaron riegos diarios desde la fecha de plantación hasta el 30 de septiembre de 2011, aportando un total de 325 mm. Con el agua de riego se aportó fertilizante, en equilibrio 15-15-15, a razón de 75 kg ha⁻¹ de N. A partir de esa fecha, hasta junio de 2012, solo recibió agua de lluvia, registrándose un total de 373 mm.

Una vez comprobada la supervivencia y la apreciable homogeneidad en el crecimiento de las plantas, en junio de 2012 tuvo lugar el verdadero inicio del estudio sobre riego y fertilización. Por tanto, este ensayo analizó el 2º y 3º año de cultivo. En esta fecha las plantas tenían 13.5 meses de edad, un diámetro en la base del tronco, medido a 5-7 cm de altura desde el suelo, de 63.4 ± 8 mm y una altura de 4.6 ± 0.5 m. El suelo de la parcela es un suelo agrícola, de textura franco-arenosa y el horizonte superficial (0-20 cm) tenía las siguientes propiedades: pH = 4.8 ± 0.2, MO = 0.76 ± 0.40 %, CE = 58.2 ± 7.3 µS cm⁻¹, N (Kjeldahl) = 0.32 ± 0.09 g kg⁻¹, P (Olsen) = 2.35 ± 0.08 mg kg⁻¹, K asimilable = 45.7 ± 3.7 mg kg⁻¹. El clima es mediterráneo con influencia atlántica de inviernos suaves, con 540 mm y 16 °C de precipitación y tem-

R4F0	R0F1	R2F2	R2F1	R1F0	R0F2	Bloque 4
R0F0	R2F0	R1F1	R1F2	R4F2	R4F1	
R1F0	R4F2	R2F1	R0F1	R0F0	R0F2	Bloque 3
R4F1	R2F0	R4F0	R2F2	R1F1	R1F2	
R0F1	R1F2	R1F1	R2F0	R2F1	R4F1	Bloque 2
R4F2	R1F0	R0F0	R2F2	R4F0	R0F2	
R2F1	R0F2	R4F2	R4F1	R0F0	R0F1	Bloque 1
R2F2	R1F2	R2F0	R1F0	R1F1	R4F0	

Figura 1. Diseño experimental y codificación de los tratamientos de cultivo aplicados: R = riego (R0: control sin regar; R1: 325 mm; R2: 646 mm; R4: 1298 mm); F = fertilización (F0: control sin fertilizar; F1: 150 kg ha⁻¹ de N; F2: 300 kg ha⁻¹ de N).

peratura media anual, en los últimos 15 años. En la parcela de ensayo se aplicaron 12 tratamientos de cultivo (*Fig. 1*), distribuidos aleatoriamente en un diseño factorial completo con cuatro niveles de riego (R0: control sin regar; R1: 325 mm; R2: 646 mm; R4: 1298 mm) y tres de fertilización (F0: control sin fertilizar; F1: 150 kg ha⁻¹ de N; F2: 300 kg ha⁻¹ de N). La parcela elemental consistió en tres filas de cinco plantas cada una, tomando las mediciones en las tres plantas centrales de la fila central, para evitar el efecto borde. La parcela estaba completamente expuesta al agua de lluvia. El riego se aplicó de abril a septiembre de cada año. El fertilizante se aplicó disuelto en el agua de riego, en equilibrio 16-8-12 (2MgO, 12SO₃), también se añadió 2.6 CaO y micronutrientes. En el caso de los tratamientos sin riego (R0), el fertilizante se añadió enterrando ligeramente en el suelo Basacote® Plus 6M 16-8-12 (2-10), que además contiene micronutrientes, 2 % de MgO y 12 % de SO₃ total, más 2.6 CaO, en dos aplicaciones anuales (junio y febrero).

La precipitación anual caída durante cada año de estudio fue 510 mm (junio-12 a junio-13) y 326 mm (junio-13 a junio-14), de los que el 75% cayeron en primavera y otoño, 20 % en invierno y 5 % en verano (*Fig. 2*). Se tomaron mediciones estacionales de altura (H) y diámetro (D) y se cosecharon 15 árboles tipo a lo largo del período de estudio, distintos de los usados para las mediciones de D y H, en el rango 23-150 mm de diámetro en la base del tronco, con el fin de establecer ecuaciones alométricas que relacionen D y/o H con la biomasa seca del árbol. La biomasa seca se determinó tras secado en estufa a 80 °C.

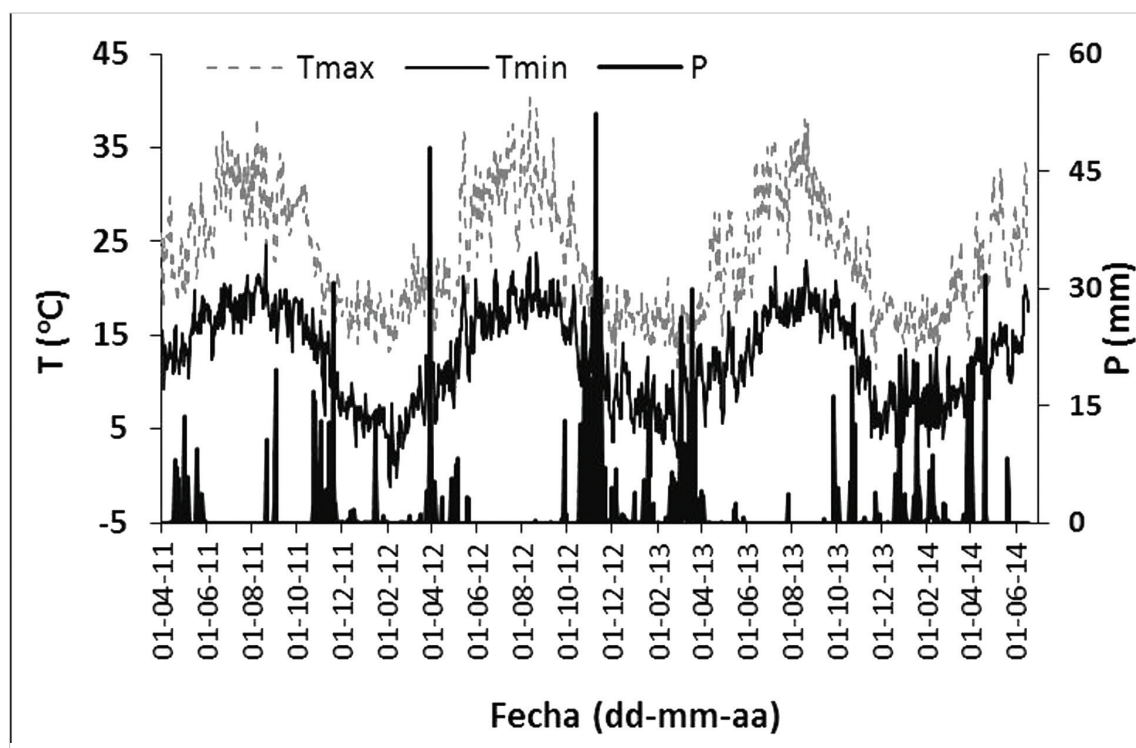


Figura 2. Evolución de las temperaturas, máxima (Tmax) y mínima (Tmin), y de las precipitaciones diarias registradas durante el estudio.

Los datos se trataron estadísticamente en un modelo lineal, mediante ANOVA de medidas repetidas con dos factores. Los efectos inter-sujetos, el Riego y la Fertilización, se consideraron fijos, mientras que las distintas fechas de medición fueron los efectos intra-sujetos. Se introdujo como covariable el diámetro del tronco al inicio de la aplicación de los tratamientos de riego y fertilización (junio-2012). Cuando las diferencias entre los tratamientos resultaron significativas para algún parámetro, la diferenciación entre grupos homogéneos se analizaron mediante el test de Tukey HSD o T3-Dunett, dentro de cada fecha de medición, según se cumpliera o no la igualdad de varianzas. El bloque se consideró como efecto aleatorio. Todas las diferencias significativas se consideraron para $\alpha = 0.05$. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el software SPSS® v19.0.

3. Resultados

En los dos años que duró este estudio no hubo problemas de supervivencia. Sobrevivieron el 100 % de los árboles, aunque durante el último año, cuando los árboles desarrollaban su tercer año de crecimiento, un 3 % de ellos sufrió vuelcos, o fracturas a la mitad del fuste, debidos al viento. Dichos árboles dañados fueron apartados de las mediciones y sustituidos por otros en caso de que correspondiese medir en ellos. Partiendo de 4.6 m al inicio del ensayo (junio-2012), la altura media alcanzada por los árboles en los dos años siguientes fue de 8.8 ± 0.8 m y 12.0 ± 1.1 m, respectivamente. Dicho lo anterior, para exponer la evolución del crecimiento de las plantas, vamos a centrarnos en el diámetro del tronco (D), medido en la base (*Fig. 3*). Además, como veremos más adelante, este parámetro se comportó mejor que H como predictor o estimador de la biomasa de la planta. Entre junio de 2012 y junio de 2014 el incremento en diámetro (ΔD) presentó diferencias significativas entre niveles de riego ($p < 0.001$) y de fertilización ($p < 0.001$), pero no para su interacción R x F ($p = 0.500$). Los valores obtenidos fueron:

- En el caso del riego, 64.5 ± 2.6 mm para R0, 73.9 ± 2.5 mm para R1, 77.1 ± 2.4 mm para R2 y 88.7 ± 2.8 mm para R4, agrupándose estadísticamente en tres grupos homogéneos ($R0 < R1$, $R2 < R4$).
- Mientras que para la fertilización, 67.7 ± 2.4 mm para F0, 75.2 ± 2.3 mm para F1 y 85.3 ± 2.3 mm para F2, con agrupación estadística en tres grupos ($F0 < F1 < F2$).

De las distintas ecuaciones alométricas analizadas, como primera aproximación y por su sencillez y alto grado de ajuste, se escogió la de tipo potencial para este clon ($B = a \cdot D^b$, siendo B la biomasa leñosa seca de la planta, en gramos; y D el diámetro en la base, en mm); posteriormente se extrapoló el valor medio de árbol a la hectárea de terreno. Sin intención de profundizar en ello, se habían probado hasta 16 modelos distintos (potencial, exponencial, logarítmico, polinómico, etc.), introduciendo como variables independientes (D, D y H, D^2 , D^2H ...). Las ecuaciones ajustadas que resultaron del modelo potencial, para cada una de las partes del árbol, se mues-

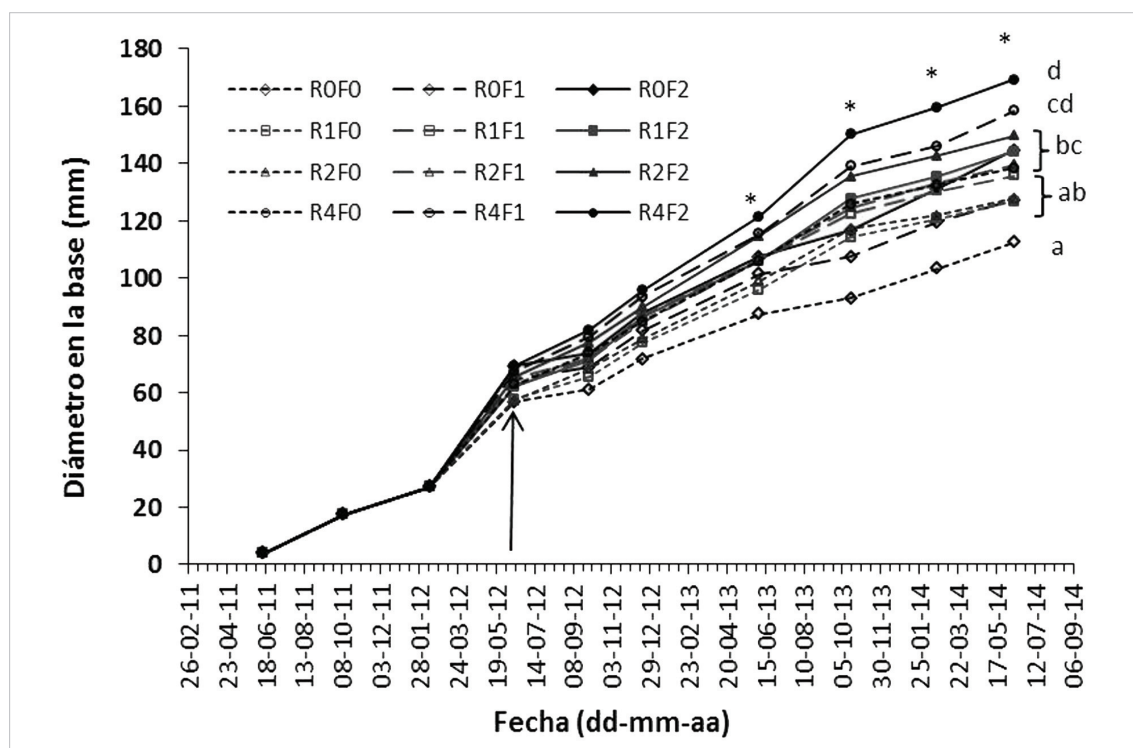


Figura 3. Evolución estacional del incremento del diámetro basal (ΔD) para los 12 tratamientos ensayados. La flecha indica el inicio de los tratamientos de riego y fertilización. Se obtuvieron diferencias significativas entre riegos ($p < 0.001$) y entre fertilizaciones ($p < 0.001$). Los asteriscos (*) indican las fechas concretas en las que se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos. Para la última fecha de medición (junio-2014) se detalla, mediante letras distintas, aquellos tratamientos que se diferenciaron entre sí ($p < 0.001$).

tran en la *figura 4*. Una vez medido el reparto de biomasa seca aérea de los árboles muestreados, se pudo estimar la proporción de biomasa foliar contenida en la parte aérea y su relación con el tamaño del árbol (*Fig. 5*).

Durante los dos años estudiados, la producción de biomasa seca aérea (tallos + hojas) mostró diferencias significativas entre riegos ($p < 0.001$) y fertilizaciones ($p < 0.001$) pero no para la interacción riego x fertilización ($p = 0.134$). El ranking entre fertilizaciones para la producción de biomasa seca fue F0 ($27.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < F1 ($35.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < F2 ($42.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), mientras que el de riegos resultó R0 ($28.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) $\leq$ R1 ($31.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) $\leq$ R2 ($34.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) $\leq$ R4 ($45.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Los valores más extremos de los tratamientos aplicados fueron para R0F0 ($20.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y R4F2 ($55.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), el más bajo y el más alto respectivamente. La *figura 6* muestra las producciones medias de biomasa seca obtenidas para cada combinación de riego y fertilización. De ella se desprende un incremento medio de la producción de 0.95, 1.33 y $1.53 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ por cada 100 mm de incremento de la disponibilidad de agua, para F0, F1 y F2 respectivamente. Asimismo, en un análisis preliminar, para este estudio y en los dos años analizados, la producción de biomasa se ajustó al modelo $BS = 15.02 + 0.013 (R+P) + 0.05 F$ ($n = 12$, $R^2 = 0.92$, $p < 0.001$),

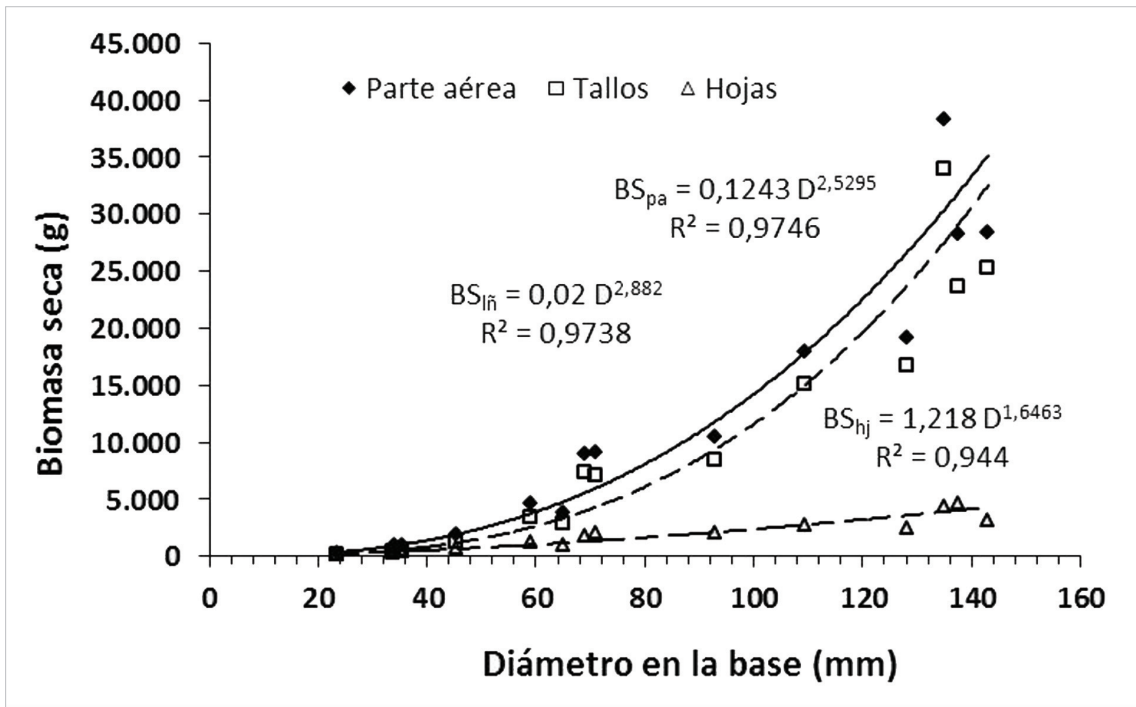


Figura 4. Relación entre el diámetro medido en la base del tronco (a 5-7 cm sobre el suelo) y la biomasa seca de la parte aérea (BS_{pa}), de las hojas (BS_{hj}) y del tejido leñoso (BS_{li}).

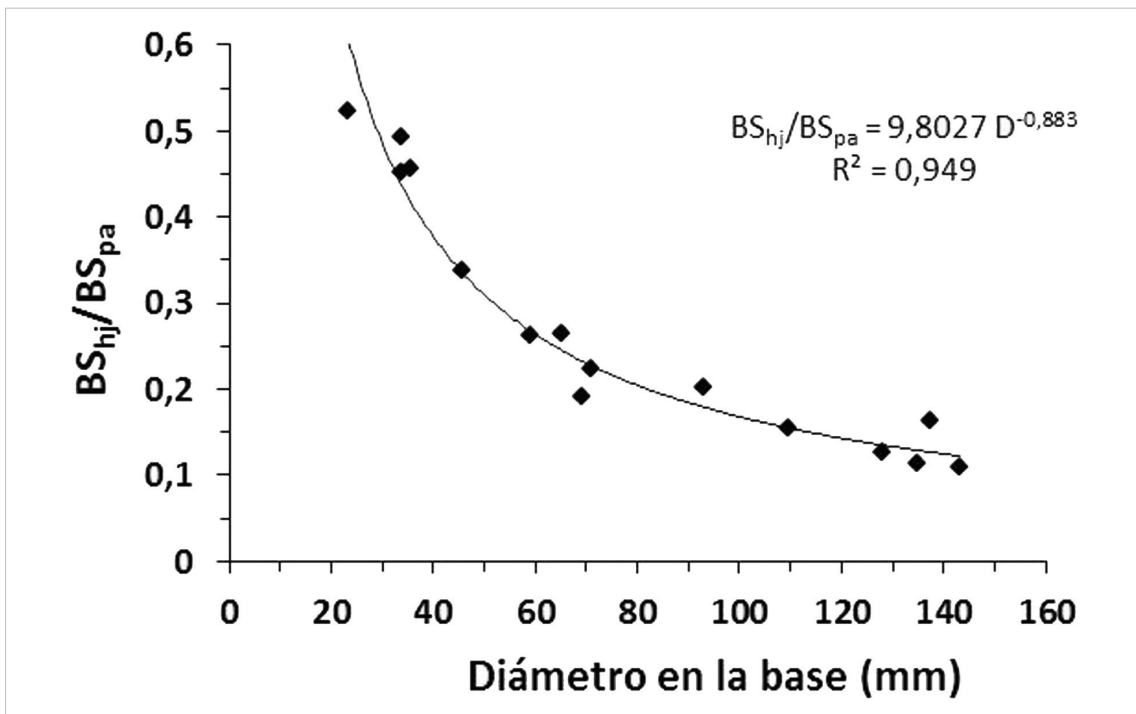


Figura 5. Relación entre la proporción de biomasa seca foliar contenida en la parte aérea (BS_{hj}/BS_{pa}) y el diámetro en la base del tronco principal (medido a 5-7 cm del suelo). $p < 0.001$; válida para el rango de diámetros entre 20 y 150 mm.

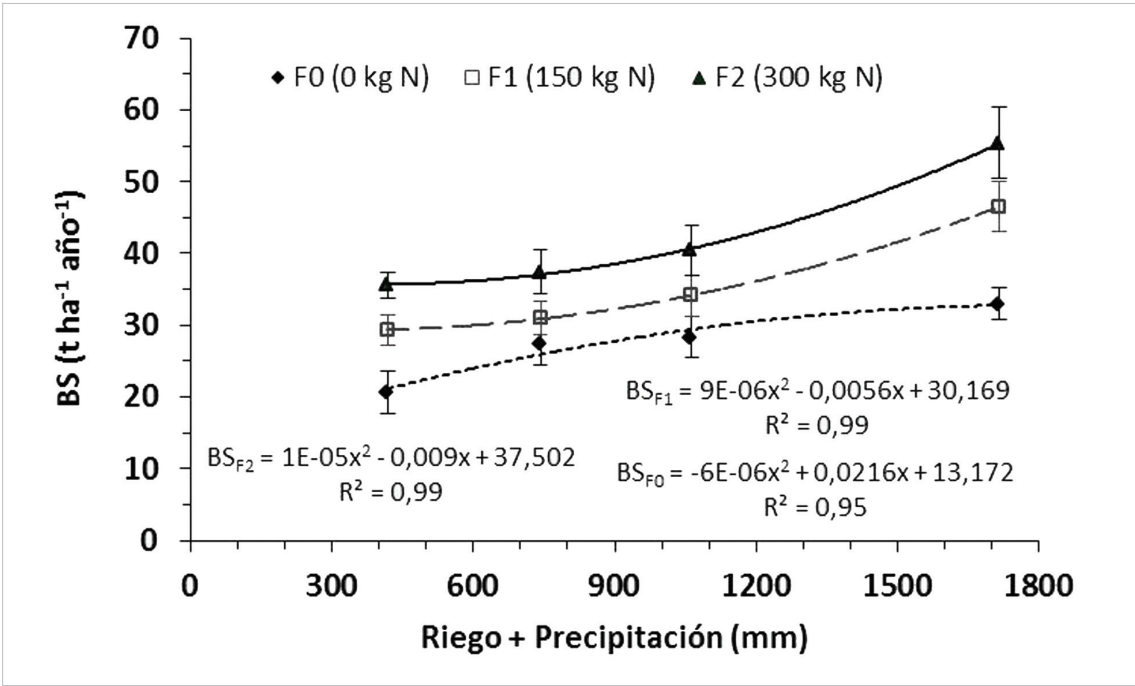


Figura 6. Biomasa seca aérea producida en los dos años estudiados, en función de la disponibilidad de agua (riego + precipitación) y la fertilización aplicada (F0, F1, F2).

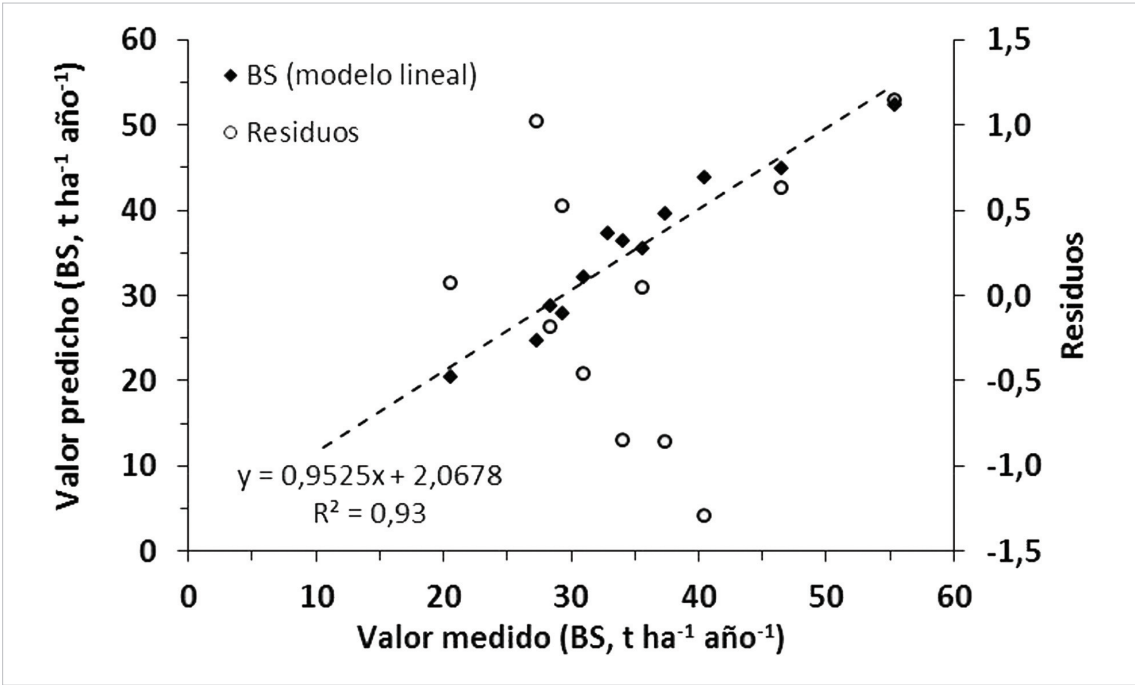


Figura 7. Primera aproximación para la estimación del modelo de producción de biomasa de este ensayo en función de las dos variables predictoras ensayadas (riego y fertilización). $BS = 15.02 + 0.013 (R+P) + 0.05 F$, siendo: BS la biomasa seca de la parte aérea (t ha⁻¹ año⁻¹); (R+P) la aportación de agua anual mediante riego y precipitación (en mm); y F la fertilización anual aplicada (en kg de nitrógeno).

siendo: BS la biomasa seca de la parte aérea ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$), $(R+P)$ la aportación anual de agua mediante riego y precipitación (en mm) y F la fertilización anual aplicada (en $kg\ ha^{-1}$ de N) (Fig. 7).

4. Discusión

De la observación de la evolución del crecimiento diametral, se puede deducir que el período de actividad vegetativa abarcó el año completo, con mayores crecimientos durante la primavera y el otoño, pero sin parada invernal, ni estival en los tratamientos regados. Solamente en los tratamientos sin aporte de riego ($R0Fx$) se observó una importante disminución o una parada del crecimiento durante el verano. La densidad de plantación ($2500\ plantas\ ha^{-1}$) y la altura alcanzada (superando 12 m en tres años) posiblemente favorecieron el vuelco, inclinación o factura del 3 % de los árboles. El tamaño alcanzado por los árboles en este estudio ha sido considerable, sin embargo queda dentro del potencial de crecimiento manifestado por esta especie en lugares de condiciones favorables (Coble *et al.*, 2014), así como para otras especies emparentadas como *E. grandis* (Pérez *et al.*, 2013).

La ecuación potencial, usando como variable independiente solamente el diámetro en la base del tronco, resultó un buen estimador de la biomasa seca. Ecuaciones alométricas sencillas, como las aquí presentadas, han sido obtenidas por otros autores (Almeida *et al.*, 2004; Stape *et al.*, 2004), aunque la incorporación de otros parámetros, aparte del diámetro, como altura o radio de copa podrían mejorar un poco la estimación (Parrotta, 1999; Jiménez *et al.*, 2007; Pérez-Cruzado *et al.* 2011; Bouvet *et al.*, 2013; Rutishauser *et al.*, 2013). La ventaja de utilizar solamente el diámetro es su facilidad de medición comparando, por ejemplo, con la altura o el ancho de copa, ya que estas últimas presentan dificultad de medición cuando la espesura es alta y los árboles de gran tamaño. La relación entre biomasa foliar y biomasa de parte aérea (BS_{hj}/BS_{pa}) disminuyó a medida que aumentaba el tamaño del árbol, con un fuerte descenso hasta alcanzar los 70 mm de diámetro en la base (de 0.5-0.6 a 0.2) y una caída más moderada hasta 150 mm (de 0.2 a 0.10-0.12). Este patrón de comportamiento de BS_{hj}/BS_{pa} se ha encontrado en otros estudios con eucalipto (Bouvet *et al.*, 2013) y puede servir de ayuda para la gestión de las plantaciones, incorporando un criterio más en la determinación del turno de corta, la mínima ratio entre exportación de nutrientes y biomasa extraída, ya que estos están más concentrados en el tejido foliar que en el leñoso.

En cuanto a biomasa seca producida, a mayor disponibilidad de los recursos proporcionados (agua y fertilizante), mayor producción, con efecto diferenciado de cada uno de ellos pero con una cierta sinergia cuando los dos recursos son aportados en cantidad suficiente. Esta relativa independencia del riego y la fertilización puede ser debida a los efectos diferenciados que originan sobre la transpiración, el área basimétrica, la superficie foliar, el índice de área foliar o la fotosíntesis (Whitehead and Beadle, 2004; Samuelson *et al.*, 2007). El tratamiento ($R4+P$) solo mostró su verdadero potencial de crecimiento cuando se superaron los 1500 mm, acompañados de fer-

tilización, lo que puede deberse a la sinergia de los dos factores, por la cual se produjo un incremento de la eficiencia en el uso de los recursos del lugar de plantación al disponer de mayor cantidad de ambos (Smethurst *et al.*, 2003; Binkley *et al.*, 2004; Smethurst *et al.*, 2004; Stape *et al.*, 2004; Whitehead and Beadle, 2004). En concordancia con los tamaños alcanzados en D y H, se obtuvieron producciones de biomasa en los rangos más altos de los publicados por otros autores (Beadle and Sands, 2004; Stape *et al.*, 2004; Rockwood *et al.*, 2008; Hubbard *et al.*, 2010). Cabe añadir que en este estudio estamos hablando de producciones de biomasa seca aérea (que incluye hojas, ramas y tronco con corteza). Asimismo, hay que ser cautos en la extrapolación de estos resultados a plantación comercial, ya que pudiera estar sobrevalorada por haber considerado un 100 % de supervivencia de los árboles y por las reducidas dimensiones de la parcela, que permitían un alto grado de homogeneidad en el suelo y en el control de la aplicación del riego y la fertilización.

Para la zona de estudio, con precipitación media anual en torno a 540 mm, parecería excesivo intentar proporcionar a las plantaciones los más de 1000 mm de agua y la fertilización adicional que necesitarían para una óptima producción, por razones económicas y ambientales (Fisher and Binkley, 2000; McLaughlin *et al.*, 2000; Smethurst *et al.*, 2004; Whitehead and Beadle, 2004). Pensemos que a los cultivos agrícolas arbóreos más exigentes en riego no se le suelen proporcionar más de 600 mm. No obstante, aún en los tratamientos de menor disponibilidad de agua, las producciones han sido elevadas, igualando o superando a otras especies de eucaliptos (Ruiz *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2013; Pérez-Cruzado *et al.*, 2011), pero cabe señalar que se trata de un secano que recibió 418 mm de precipitación media anual. Por otro lado, la respuesta experimentada por los tratamientos sin riego (R0Fx), con parada estival, y observaciones realizadas en otras parcelas con esta especie, evidencian su falta de resistencia a la sequía, con importante reducción del crecimiento y/o pérdida de masa foliar cuando la precipitación anual cae por debajo de 400 mm.

Como conclusiones, podemos destacar que *Eucalyptus x urograndis* se adaptó bien a las condiciones edafo-climáticas de la provincia de Huelva, pero necesita gran aporte anual de riego (≥ 1000 mm) y fertilización (≥ 100 kg ha⁻¹ de N) para desarrollar su verdadero potencial productivo frente al de otras especies. Puede utilizarse en cultivos energéticos de turno corto (3 años) por su rápido crecimiento, con producciones por encima de 20 t ha⁻¹ año⁻¹ de biomasa seca aérea. A los 3 años y con esos crecimientos, la biomasa seca foliar supondría un 10-12 % de la biomasa total cosechada.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Plan Nacional I+D+i, ref. AGL2010-16575 y CTQ2013-46804-C2-1-R), por los fondos FEDER de la UE y por la empresa ENCE, energía y celulosa S.A. Contó con el apoyo del Campus de Excelencia Internacional CEI Cambio.

6. Referencias

- Almeida, A.C., Landsberg, J.J., Sands, P.J., 2004. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *For. Ecol. Manage.* 193, 179-195. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.029
- Beadle, C., Sands, P., 2004. Synthesis of the physiological, environmental, genetic and silvicultural determinants of the growth and productivity of eucalypts in plantations. *For. Ecol. Manage.* 193, 1-3. doi:10.1016/j.foreco.2004.02.010
- Bouvet, A., Nguyen-The, N., Melun, F., 2013. Nutrient concentration and allometric models for hybrid eucalyptus planted in France. *Ann. For. Sci.* 70, 251-260. doi: 10.1007/s13595-012-0259-3
- Coble, A.P., Autio, A., Cavaleri, M.A., Binkley, D., Ryan, M.G., 2014. Converging patterns of vertical variability in leaf morphology and nitrogen across seven *Eucalyptus plantations* in Brazil and Hawaii, USA. *Trees*, 28: 1-15. doi: 10.1007/s00468-013-0925-6
- Fernández, M., Marcos, C., Tapias, R., Ruiz, F., López, G., 2007. Nursery fertilisation affects the frost-tolerance and plant quality of *Eucalyptus globulus* Labill. Cuttings. *Ann. For. Sci.* 64, 865-873. doi: 10.1051/forest:2007071
- Fernández, M., Tapias, R., Alesso, P., 2010. Adaptación a la sequía y necesidades hídricas de *Eucalyptus globulus* Labill. en Huelva. *Boletín del CIDEU*, 8-9: 31-41.
- Fernández, M., Tapias, R., Alesso, P., Ruiz, F., López, G., 2012. Variación estacional del incremento diametral diario de cuatro clones de *Eucalyptus globulus* Labill. en Huelva medido con dendrómetros de precisión. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 35: 143-149.
- Fisher, R.F., Binkley, D., 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 489.
- Hubbard, R.M., Stape, J., Ryan, M.G., Almeida, A.C., Rojas, J., 2010. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. *For. Ecol. Manage.* 259, 1714-1721. doi:10.1016/j.foreco.2009.10.028
- Jiménez, E., Vega, J.A., Pérez-Gorostiaga, P., Fonturbel, T., Cuiñas, P., Fernández, C., 2007. Evaluación de la transpiración de *Eucalyptus globulus* mediante la densidad de flujo de savia y su relación con variables meteorológicas y dendrométricas. *Boletín del CIDEU*, 3: 119-138.
- N.B. McLaughlin, N.B., Hiba, A., Wall, G.J., King, D.J., 2000. Comparison of energy inputs for inorganic fertilizer and manure based corn production. *Can. Agric. Eng.* 42, 009-017.
- Pallett, R.N., Sale, G., 2004. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. *For. Ecol. Manage.* 193, 33-43. doi:10.1016/j.foreco.2004.01.021
- Parrotta, J. A., 1999. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. *For. Ecol. Manage.* 124, 45-77.
- Pérez, C., Frangi, J., Goya, J., Luy, A., Arturi, M., 2013. Contenido de nutrientes en las raíces finas y el mantillo de rodales de *Eucalyptus grandis* de diferente edad en la Mesopotamia Argentina. *Bosque* 34(3), 303-310. doi: 10.4067/S0717-92002013000300006.
- Pérez, S., Renedo, C.J., Ortiz, A., Mañana, M., Delgado, F., Tejedor, C., 2011. Energetic density of different forest species of energy crops in Cantabria (Spain). *Biomass and Bioenergy* 35, 4657-4664. doi:10.1016/j.biombioe.2011.09.008

- Pérez-Cruzado, C., Merino, A., Rodríguez-Soalleiro, R., 2011. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. *Biomass and Bioenergy* 35, 2839-2851. doi: doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.020
- 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. doi:10.1071/FP03055
- Rockwood, D.L., Rudie, A.W., Ralph, S.A., Zhu, J.Y., Winandy, J.E., 2008. Energy product options for *Eucalyptus* species grown as short rotation woody crops. *Int. J. Mol. Sci.*, 9, 1361-1378. doi: 10.3390/ijms9081361
- Ruiz, F., López, G., Toval, G., Alejano, R., 2008. Selvicultura de *Eucalyptus globulus* Labill. En: Serrada, R., Montero, G., Reque, J.A. (eds.) *Compendio de selvicultura aplicada en España*. INIA-Fundación Conde del valle de Salazar, Madrid, pp: 117-154.
- Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Ruffi'ie, Hergoualc'h, K., Verchot, L., 2013. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *For. Ecol. Manage.* 307, 219-225. doi: 10.1016/j.foreco.2013.07.013
- Samuelson, L.J., Stokes, T.A., Coleman, M.D., 2007. Influence of irrigation and fertilization on transpiration and hydraulic properties of *Populus deltoides*. *Tree Physiol.* 27, 765-774.
- Smethurst, Ph., Baillie, C., Cherry, M., Holz, G., 2003. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. *For. Ecol. Manage.* 176, 531-542. doi:
- Smethurst, Ph., Holza, G., Moronia, M., Baillie, C., 2004. Nitrogen management in *Eucalyptus nitens* plantations. *For. Ecol. Manage.* 193, 63-80. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.023
- 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. doi:10.1016/j.foreco.2004.01.020
- Whitehead, D., Beadle, C.L., 2004. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *For. Ecol. Manage.* 193, 113-140. doi:10.1016/j.foreco.2004.01.026
- 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.