



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-206

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Balance energético en el primer ciclo de corta de tres especies de eucalipto en el secano Mediterráneo de la Región del Maule con diferentes niveles de manejo.

CABRERA ARIZA, A.¹, ESPINOZA MEZA, S.¹ y SANTELICES MOYA, R.¹

¹Centro de Desarrollo para el Secano Interior, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile

Resumen

El Secano Mediterráneo de la Región del Maule de Chile es una zona degradada, con altas tasas de erosión y poco productiva. Una alternativa para esta zona es el cultivo de especies de eucalipto con destinación energética. El objetivo de esta investigación fue evaluar el balance energético a pie de campo en la primera rotación de tres especies de eucalipto, comparando un manejo básico y un manejo intensivo. Para ello las especies *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus globulus* fueron plantadas con dos diferentes niveles de manejo, uno básico (subsulado, plantación y cosecha) y otro intensivo (arado profundo, subsulado, aplicación de herbicida, plantación, fertilización y cosecha). Los resultados muestran que para ambos tipos de manejo el balance energético es positivo, siendo superior el balance en el caso del manejo intensivo, con valores que varían entre 34.300 y 44.630 MJ ha⁻¹ año⁻¹ en el manejo básico y 43.376 y 53.350 MJ ha⁻¹ año⁻¹ en el manejo intensivo, dependiendo en ambos casos de la especie. A modo de conclusión, las plantaciones energéticas con especies del género eucalipto son una alternativa viable para zonas de secano, especialmente la especie *Eucalyptus camaldulensis*.

Palabras clave

Biomasa, energía, manejo básico, manejo intensivo.

1. Introducción

El Secano Interior de Chile, y en particular el de la Región del Maule, con una superficie de más de 540.000 hectáreas, se caracteriza por exhibir condiciones de sitio que resultan marginales para los cultivos tradicionales, tanto agrícolas como forestales. En esta vasta área, el 51% de los suelos tiene algún grado de erosión y los cultivos presentan rendimientos muy inferiores a los valores óptimos. En este contexto, una posible alternativa para esta zona es el cultivo de especies de eucalipto con destinación energética. Los cultivos lignocelulósicos pueden ser utilizados para producir calor y electricidad a través de la combustión directa o la producción de *biofuel* o biogás a través de la pirólisis y gasificación (MANTINEO et al., 2009, SEVIGNE et al., 2011). La energía proveniente de la biomasa, tanto lignocelulósica como herbácea, se presenta como una alternativa energética sostenible y amigable con el medio ambiente; de hecho, se considera que la energía obtenida a partir de biomasa no tiene emisiones de carbono, ya que el carbono emitido en la combustión es el mismo que las plantas absorben mientras crecen (THE ROYAL SOCIETY 2008).

Un elemento importante a destacar en el uso de cultivos alternativos para la producción de energía es la evaluación de la sostenibilidad ambiental de dichos cultivos a largo plazo (BONARI et al., 1992). A tal propósito, el balance energético, representa un instrumento adecuado para la evaluación de dicha sostenibilidad, no se puede gastar más energía en el proceso de la que potencialmente se va a generar. El balance energético pone de manifiesto la energía producida por unidad de energía empleada en el proceso de producción y transformación de la biomasa en energía eléctrica (SCHOLZ

2002). Dicho balance ha sido ampliamente usado en diferentes trabajos (BONARI 1992, DUBUISSON Y SINTZOFF 1998, WEST Y MARLAND 2002, HELLER 2003, SARTORI 2005, MEAD 2006, BOEHMEL 2008, GASOL 2009, NASSI O DiNASSO et al. 2010, CABRERA et al. 2014), obteniendo diferentes resultados dependiendo de la especie y los medios analizados. En este sentido, el trabajo realizado, evalúa el balance energético a pie de campo en la primera rotación de tres especies de eucalipto, comparando un manejo básico y un manejo intensivo, planteando la hipótesis de que una mayor inversión energética en el manejo se verá reflejada en una mayor producción de biomasa y por lo tanto el balance energético será más positivo que en el caso de un manejo básico de la plantación.

2. Objetivos

Evaluar el balance energético a pie de campo en la primera rotación de tres especies de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus globulus*), comparando un manejo básico y un manejo intensivo.

3. Metodología

El ensayo se desarrolló en un sitio en la localidad de Huerta Maule, comuna de San Javier, Región del Maule, coordenadas geográficas de ingreso a la parcela 35°38'26.02" S 72°00'33.35" O, presentando características climáticas con precipitaciones medias anuales que están en el rango de 696-926 milímetros año⁻¹ (SANTIBÁÑEZ Y URIBE 1993) rango que está dentro de los requerimientos de las especies del estudio. La parcela, de una superficie total de 5 hectáreas, fue plantada en el año 2013 con tres especies de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus globulus*). La plantación se efectuó de forma manual con una pala plantadora o pala neozelandesa y se estableció con un marco de plantación de 3 metros entre filas y un metro entre plantas. Los tratamientos fueron dos diferentes niveles de manejo, uno básico y uno intensivo. Se realizaron parcelas de 2.500 m² para cada especie y tratamiento, realizándose tres réplicas de cada tratamiento, teniendo una superficie efectiva de ensayo de 45.000 m² (2.500 m² X 3 especies X 2 tratamientos X 3 réplicas). El suelo fue preparado por medio de arado profundo a 50 cm (tratamiento intensivo), seguido de un subsolado con caballón (ambos tratamientos). A continuación se aplicó herbicida pre-plantación (Terbutilazina, Click®75, 3 kg ha⁻¹) y una fertilización, usando 600 kg ha⁻¹ de fertilizante 8-24-24 sólo en el tratamiento intensivo. La plantación fue de forma manual y la cosecha se hizo con una cosechadora-astilladora-cargadora diseñada y creada por Spapperi® y un remolque llevado por tractor para la recogida del astillado en ambos tratamientos. La cosecha se realizó en el año 2016, cuando la plantación contaba con una edad de 3 años.

Se midieron las variables morfológicas diámetro a altura de pecho (mm) y altura (cm). El diámetro de cuello (DAP), se midió con un pie de metro graduado en milímetros y la altura total se midió mediante un jalón graduado en centímetros, desde la superficie del suelo hasta el ápice central de la planta. Para el cálculo de la biomasa, las diferentes muestras fueron introducidas en estufa a 60 °C hasta que alcanzaron peso constante. La biomasa por hectárea se obtuvo de la media de los individuos seleccionados multiplicada por la densidad de plantación.

Balance energético.

Para la determinación del balance energético se siguió la metodología usada por CABRERA et al. (2014), es decir, se consideraron los flujos de energía asociados a las operaciones necesarias para el cultivo de las diferentes especies, excluyendo la energía necesaria para el transporte del producto a la central de conversión, es decir, se ha realizado un balance energético a pie de campo u orilla del camino. La energía de mano de obra y producción de las estacas para la plantación no se tuvo en cuenta por ser inferior al 0,2 % del total de la energía (BOEHMEL 2008). En la determinación de los insumos (*inputs*) energéticos necesarios para la realización del cultivo se consideraron:

- Los costos energéticos para la fabricación y reparación de las máquinas agrícolas.

- Los costos para la producción de los fertilizantes y herbicidas.
- Los costos por el consumo de combustible y aceite lubricante en las diferentes operaciones de cultivo.

Se asume que las máquinas y los aperos se usaron en 200 hectáreas y tienen una vida útil de 10 años (BONARI *et al.* 1999). Los costos energéticos para la construcción, depreciación y mantenimiento de los tractores se calcularon teniendo en cuenta la vida media y el tiempo de uso encada operación de cultivo (CABRERA *et al.* 2014). La producción de energía obtenida del sistema (*outputs*) fue determinada multiplicando la producción en materia seca por el poder calorífico de la biomasa de las diferentes especies (calculado usando la bomba calorimétrica de Mahler según el método ASTM D 2015). Sucesivamente, se calculó la producción de energía neta (*output-input*). Para el cálculo de la energía neta, se usó la siguiente fórmula

[1]: $Outputs - Inputs = \text{Energía producida (poder calorífico} \times \text{cosecha)} - \text{Energía consumida (operaciones} + \text{energía de los factores productivos)}$

Se creó una base de datos para determinar la energía empleada en la realización de cada una de las operaciones de cultivo, detallando el costo energético directo y el indirecto de las diferentes operaciones (siendo el costo directo el que se refiere al costo de la operación específica, mientras que el costo indirecto es el que se refiere al costo energético debido a la construcción del tractor y de los aperos). Los datos presentados en la tabla 1 forman parte la base de datos del *software* Sisco, desarrollado para el cálculo de balances energéticos en el Centro Enrico Avanzi de Pisa (BONARI 1999).

Tabla 1. Energía directa e indirecta empleada en las operaciones de cultivo, fertilización, herbicidas y cosecha.

Energía consumida (MJ ha ⁻¹)				
Operaciones	Tractor (Kw)	Directa	Indirecta	Total
Arado profundo (40-50cm)	132	2804.8	479	3283.8
Subsolado	73	332	308	640
Aplicación fertilizante	48	334.6	161	495.6
Fertilizante 8.24.24 (MJ kg ⁻¹)	-	12.7		12.7
Aplicación herbicida	48	303	164	467
Herbicida Click 75 (MJ kg ⁻¹)	-	91.2		91.2
Plantación	-	800		810
Cosecha	132	2198	503	2701

Análisis estadístico

Se realizó una comparación de medias entre tratamientos las cuales se analizaron con ANDEVA. Las diferencias entre los tratamientos fueron analizadas con Tukey al 5 %. Para esto se utilizó el programa estadístico SPSS Statistics 18.

4. Resultados

Variables morfológicas y poder calorífico

Como se puede apreciar en la tabla 2, los crecimientos en diámetro y en altura fueron diferentes para ambos tipos de manejo, éstos fueron mayores en las especies manejadas con un nivel intensivo. En particular, la especie *E. camaldulensis*, fue la que presentó los mejores valores en diámetro y altura en ambos tipos de manejo. En cuanto a la cantidad de biomasa producida, también, y como era de esperar, son mayores los valores obtenidos en el manejo intensivo respecto al manejo básico, siendo igualmente la especie *E. camaldulensis* la que mayor cantidad de biomasa por hectárea produce. En cuanto al poder calorífico, los valores son muy cercanos entre las tres especies, siendo *E. tereticornis* la especie que presenta un mayor poder calorífico.

Tabla 2. Variable morfológicas (altura, diámetro), biomasa y poder calorífico de tres especies de eucaliptus con dos niveles de manejo

Nivel de manejo	Especie	Diámetro (cm)	Altura (m)	Biomasa (Ton ha ⁻¹)	Poder calorífico (MJ kg ⁻¹)
Básica	<i>E. camaldulensis</i>	4,74	5,42	7,2	19,2
	<i>E. tereticornis</i>	4,24	5,28	5,5	19,5
	<i>E. globulus</i>	4,38	4,90	6,2	18,1
Intensiva	<i>E. camaldulensis</i>	5,25	6,50	9,1	19,2
	<i>E. tereticornis</i>	4,76	6,10	7,2	19,5
	<i>E. globulus</i>	4,89	5,90	8,0	18,1

Balance energético

En cuanto al balance energético, los resultados que se muestran en la tabla 3, indican que la energía neta producida es mayor en el manejo intensivo con la especie *E. camaldulensis*. En general, si comparamos la misma especie con diferentes niveles de manejo, en todos los casos, el manejo intensivo arroja una producción de energía neta mayor, sin embargo, si comparamos especies, los valores netos más altos los da la especie *E. camaldulensis* en ambos niveles de manejo. En cuanto la eficiencia energética, es mucho mejor en el nivel de manejo básico que en el intensivo para todas las especies.

Tabla 3. Energía neta producida y eficiencia energética para tres especies de eucaliptus con dos niveles de manejo

Nivel de manejo	Especie	Input (GJ/ha)	Output (GJ/ha)	Energía neta (GJ/ha)	Eficiencia energética
Básica	<i>E. camaldulensis</i>	4,35	138,24	133,89	31,77
	<i>E. tereticornis</i>	4,35	107,25	102,90	24,65
	<i>E. globulus</i>	4,35	112,22	107,87	25,79
Intensiva	<i>E. camaldulensis</i>	14,67	174,72	160,05	11,91
	<i>E. tereticornis</i>	14,67	140,40	125,73	9,57
	<i>E. globulus</i>	14,67	144,80	130,13	9,87

En general, estos resultados confirman la hipótesis planteada, es decir, una mayor inversión energética en el manejo se verá reflejada en una mayor producción de biomasa y por lo tanto en el balance energético será más positivo que en el caso de un manejo básico de la plantación.

5. Discusión

Variables morfológicas y poder calorífico

Los mayores crecimientos obtenidos en el tratamiento intensivo son esperados ya que las condiciones generadas a la planta son más favorables que en el tratamiento básico. El uso de fertilizantes al establecimiento de plantaciones manejadas intensivamente, partiendo de un adecuado control de malezas, es una herramienta clave para el aumento de la productividad forestal de especies de rápido crecimiento en Chile (RUBILAR et al. 2008). En cuanto a la cantidad de biomasa producida, los valores son inferiores a los obtenidos en otros ensayos (DIAS et al. 2005, GUO et al. 2006) donde las condiciones eran mucho mejores. Sin embargo, si comparamos con estudios realizados en Australia donde la mayoría se han desarrollado en áreas con clima mediterráneo (6 meses de período seco, precipitaciones de 350 mm año⁻¹), vemos que los resultados son comparables, incluso mejores. Por ejemplo, CROMER et al. (1976) encontraron que la biomasa total para *E. globulus* (densidad de 2.196 plantas ha⁻¹) varió de 1 ton MS ha⁻¹ año⁻¹ sin fertilización hasta 9 ton MS ha⁻¹ año⁻¹ con fertilización (con niveles de N de 202 kg ha⁻¹ y P de 90 kg ha⁻¹) a los 2 años, y 6 y 30 ton MS ha⁻¹año⁻¹ a los 4 años, con y sin fertilización respectivamente. En cuanto al poder calorífico, los valores concuerdan con los otorgados por otros autores para las mismas especies (PÉREZ 2001, QUIRINO et al. 2005)

Balance energético

En todos los supuestos, el balance de energía es positivo, sin embargo la cantidad de energía potencialmente producida es mayor en el manejo intensivo, aunque la eficiencia energética es mejor en el manejo básico para todas las especies. Ante esta situación, habría que plantearse si el desembolso energético y económico que supone un nivel de manejo intensivo realmente se traduce en una mayor ganancia en ambos aspectos. En bibliografía no se han encontrado trabajos que utilicen esta misma metodología en el cálculo del balance energético de eucalipto. Sin embargo, sí existe bibliografía al respecto del cálculo del balance energético de álamo, en este sentido, los resultados obtenidos son comparables con los extraídos en otros estudios (DUBUISSON Y SINTZOFF 1998, MATTHEWS 2001), que muestran que el cultivo de *Populus deltoides* tiene un balance energético positivo. Otros estudios (NONHEBEL 2002, MATTHEWS 2001) también tuvieron un balance

energético positivo en el cultivo de álamo. En ambos casos, el balance neto tuvo una mayor cantidad de energía ya que los estudios se realizaron en condiciones de sitio mejores que las del presente trabajo.

6. Conclusiones

El cultivo de variedades de eucalipto adaptadas a zonas de secano puede ser una alternativa viable como fuente de energía alternativa, especialmente la especie *Eucalyptus camaldulensis*. Un nivel de manejo más intensivo se traduce en una producción de energía mayor, aunque la eficiencia energética es mejor en el nivel de manejo básico. A futuro, se deben realizar más estudios, incluyendo el transporte de la biomasa a la central y el rendimiento de esta última para tener una visión global del balance energético de estas especies en zonas de secano.

7. Bibliografía

- BOEHMEL, C. LEWANDOWSK, I. CLAUPEI, W. 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agricultural systems* 96: 224-236.
- BONARI, E. PERUZZI, A. MAZZONCINI, M. SILVESTRI, N. 1992. Valutazione energetiche di sistema produttivi a diverso livello di intensificazione colturale. *L'Informatore Agrario* 1.
- BONARI, E. SILVESTRI, N. PAMPANA, S. 1999. Sisco: a practical tool to assess alternative cropping systems' performances. *Proceedings International Symposium Modelling Cropping Systems*. Lleida (Spain): 285-286.
- CABRERA, AM. TOZZINI, C. ESPINOZA, S. SANTELICES, R. BONARI, E. 2014 Cálculo del balance energético de una plantación de *Populus deltoides* clon Lux con fines energéticos en un sitio con ambiente mediterráneo. *Bosque* 35 (2): 133-139.
- CROMER, RN. RAUPACH, M. CLARKE, ARP. CAMERON, JN. 1976. Eucalypt plantations in Australia-- the potential for intensive production and utilization. In *OSLO Biomass Studies*. Australia. College of Life Sciences and Agriculture, University of Maine at Orono. p. 29-40.
- DIAS, M. COUTO, L. GARCÍA, H. BRITO, J. 2005. Avaliação de um clone de eucalipto estabelecido em diferentes densidades de plantio para produção de biomassa e energia. *Biomassa & Energia* 2(3): 177-186.
- DUBUISSON, X. SINTZOFF, I. 1998. Energy and CO₂ balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice, *Biomass Bioenerg* 15: 379-390.
- GASOL, CM. GABARREL, X. ANTON, A. RIGOLA, M. CARRASCO, J. CIRIA, P. RIERADEVALL, J. 2009. LCA of poplar bionergy system compared with *Brassica carinata* energy crop and natural gas in regional scenario. *Biomass Bioenerg* 33: 119-129.
- HELLER, MC. KEOLEIAN, GA. VOLK, TA. 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass Bioenerg* 25: 147-165.
- MANTINEO, M. D'AGOSTA, GM. COPANI, V. PATANE, C. COSENTINO, SL. 2009. Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *Field Crop Re* 114: 204-213

- MATTHEWS, RW. 2001. Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems. *Biomass Bioenerg* 21: 1–19.
- MEAD DJ, PIMENTEL D. 2006. Use of energy analysis in silvicultural decisionmaking. *Biomass Bioenerg* 30: 357-362.
- NASSI O DI NASSO, N. GUIDI, W. RAGAGLINI, G. TOZZINI, C. BONARI, E. 2010. Biomass production and energy balance of a 12-yearold short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. *GCB Bioenergy* 2: 89-97.
- NONHEBEL, S. 2002. Energy yields in intensive and extensive biomass systems. *Biomass Bioenerg* 22: 159–67.
- GUO, L. SIMS, R. HORNE, D. 2006. Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand. II. Litter fall and nutrient return. *Biomass Bioenerg* 30:393–404.
- PÉREZ, H. 2001. Estudio tecnológico de la madera del eucalipto en Cajamarca con fines estructurales. Ponencia presentada en el I Congreso Nacional del Eucalipto, organizado por la Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente de la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNDCP). sp.
- QUIRINO, WF. DO VALE, AT. ABREU DE ANDRADE, AP. SILVA, VL. DOS SANTOS, AC. 2005. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. *Revista da Madeira* 89: 100-106.
- RUBILAR, R. FOX, T. ALLE, L. ALBAUGH, T. CARLSON. C. 2008. Manejo intensivo al establecimiento de plantaciones forestales de *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp. En Chile y Argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 40: 1-6
- SARTORI, L. BASSO, B. BERTOCCO, M. OLIVIERO, G. 2005. Energy use and economic evaluation of a three year crop rotation for conservation and organic farming in NE Italy. *Biosyst Eng* 91: 245-256.
- SEVIGNE, E. GASOL, CM. BRUN, F. ROVIRA, L. PAGÉS, JM. CAMPS, F. RIEREDEVALL, J. GABARRELL, X. 2011. Water and energy consumption of *Pupulus* spp. bioenergy systems: A case study in Southern Europe. *Renew Sust Energ Rev* 15: 1133-1140.
- SCHOLZ, V. ELLERBROCK, R. 2002. The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. *Biomass Bioenerg* 23: 81-92.
- THE ROYAL SOCIETY. 2008. Sustainable biofuels: prospects and challenges. Policy document '1/08. ISBN 978 0 85403 662 2. London, UK. The Royal Society. 82 p.
- WEST, TO. MARLAND, G. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agr Ecosyst Environ* 91 (1-3): 217-232.