

# Uso de 3PG como herramienta para modelar plantaciones dendroenergéticas de

*Eucalyptus camaldulensis* en la región de Biobío, Chile

Edwin A. Esquivel-Segura<sup>1</sup>  
Rafael Rubilar-Pons<sup>2</sup>  
Simón Sandoval-Rocha<sup>3</sup>  
Eduardo Acuña-Carmona<sup>4</sup>  
Jorge Cancino-Cancino<sup>4</sup>  
Miguel Espinosa-Bancalari<sup>4</sup>  
Fernando Muñoz-Sáez<sup>4</sup>

## Resumen

Las plantaciones dendroenergéticas han mostrado rendimientos que han sido sitio-específicos. En algunos países se está iniciando una producción a gran escala sin conocer los niveles de productividad que las mismas tendrán en función a la disponibilidad de recursos de un sitio. Modelos ecofisiológicos permiten predecir la productividad de plantaciones forestales a partir de la estimación de algunos parámetros ambientales y de cada especie. El modelo 3PG ha mostrado capacidad de estimación en plantaciones de *Eucalyptus*. Hasta

## Abstract

**Use of 3PG as a tool for modelling forest plantation of *Eucalyptus camaldulensis* in the region of Bío-Bío, Chile**

Wood energy plantations have shown yields that are been site-specific. In some countries large-scale production is being initiated without knowing the productivity levels they will have in relation to the availability of site resources. Ecophysiological models allow the prediction of productivity of forest plantations using environmental

1. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; [edwinesquivel@itcr.ac.cr](mailto:edwinesquivel@itcr.ac.cr)

2. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Cooperativa de Productividad Forestal; Concepción, Chile; [rubilar@ncsfnc.cfr.ncsu.edu](mailto:rubilar@ncsfnc.cfr.ncsu.edu)

3. Arauco Bioforest, Programa de Caracterización Tecnológica, Concepción Chile. [simon.sandoval@arauco.cl](mailto:simon.sandoval@arauco.cl);

4. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales; Concepción, Chile; [edacuna@udec.cl](mailto:edacuna@udec.cl); [jcancino@udec.cl](mailto:jcancino@udec.cl); [mepinos@udec.cl](mailto:mepinos@udec.cl); [fmunoz@udec.cl](mailto:fmunoz@udec.cl)

Recibido: 27/03/2017  
Aceptado: 25/04/2017

hoy, no existen experiencias de uso de este modelo en plantaciones dendroenergéticas de alta densidad, esta publicación trata de la parametrización de 3PG para estimar con mayor certeza la productividad de plantaciones dendroenergéticas a nivel sitio-específico. Para evaluar la predicción del modelo 3PG en plantaciones dendroenergéticas se utilizaron parámetros de la literatura para la especie *Eucalyptus camaldulensis* y se evaluó la eficiencia del modelo en plantaciones de la misma especie establecidas a densidades de 5000, 7500 y 10000 árboles por hectárea que fueron establecidas en un sitio de producción forestal marginal, en suelos de origen Granítico, localizado en la Región del Biobío, Chile. Al realizar la parametrización con valores de la literatura y parámetros del proyecto permitió evidenciar una adecuada estimación en estas plantaciones donde la alometría por densidad permite un ajuste adecuado del modelo, por lo que se denota la densidad como uno de los parámetros más importantes a decidir en el establecimiento de plantaciones forestales de alta densidad.

**Palabras clave:** Bioenergía, sustentabilidad, biomasa, plantaciones forestales de alta densidad.

## Introducción

En búsqueda de una energía menos contaminante, la biomasa forestal puede ser considerada una alternativa sustentable (Richardson & Verwijst, 2007). Plantaciones con fines energéticos pueden ser una fuente de energía limpia que capturarían carbono con potencial de convertirse en una fuente energética importante (Berndes, Hoogwijk, & van den Broek, 2003; Sartori, Lal, Ebinger, & Parrish, 2006). Sin embargo, a pesar de su corta rotación con cosechas cada 3 a 5 años y rotaciones de hasta 30 años (Aylott et al., 2008), estas plantaciones pueden presentar niveles de productividad altamente variables dependientes las prácticas silvícolas y del sitio particularmente si son establecidas en sitios marginales (Richardson, 2006). En estas condiciones entre los beneficios que presentarían las plantaciones dendroenergéticas está: la protección de la erosión de suelo (Feikema et al., 2010).

Chile ha iniciado, desde finales de la década pasada, investigaciones que buscan evaluar los efectos y la sustentabilidad de plantaciones de alta densidad y corta rotación con fines energéticos. El modelar y predecir cuáles son los impactos que las mismas pueden tener en el ecosistema es de sumo interés. En plantaciones forestales se ha ampliado el uso de modelos de crecimiento los cuales hacen estimaciones fisiológicas y ambientales clave para entender los factores que influyen el crecimiento de las plantaciones (Feikema, et al., 2010).

parameters of each species as drivers. The 3PG model has been successfully used in eucalyptus plantations estimations. To date, there are no experiences using this model in high stocking wood energy plantations; this publication aims at the calibration of 3PG to accurately estimate the productivity of wood energy plantations at site-specific level. In order to evaluate the prediction of the 3PG model in wood energy plantations, we used parameters from the literature for *Eucalyptus camaldulensis* species and evaluated the efficiency of the model in plantations of the same species with stockings of 5000, 7500 and 10000 trees per hectare. These plantations were established at a marginal forest production site, of granite soil type, located at the Biobío region of Chile. When parameterization using values from literature and project parameters, an adequate estimation was evident where allometry allows an adequate adjustment of the model when stocking is considered, thus stocking density is highlighted as one of the most important parameters to be set in the establishment of high stocking forest plantations.

**Key words:** Bioenergy, sustainability, biomass, high stocking forest plantations.

Los modelos basados en procesos han sido desarrollados alrededor del mundo, y uno de los más extensamente usados es 3PG (Principios Fisiológicos en la Predicción de Crecimiento por sus siglas en inglés Physiological Principles in Predicting Growth) (Rodríguez-Suarez, Soto, Iglesias, & Diaz-Fierros, 2010), modelo eco-fisiológico desarrollado por Landsberg y Waring (1997), requiere pocos parámetros para predecir el crecimiento de las plantaciones forestales (Amichev, Johnston, & Van Rees, 2010), por lo que representa una opción interesante para predecir efectos y rendimientos, así como aportar información que permita la toma de decisión y análisis financiero por parte de agencias gubernamentales y empresas privadas (Amichev, Hangs, & Van Rees, 2011). El modelo 3PG ha sido utilizado para modelar la producción forestal, fijación de carbono, el uso del agua, entre otros, pudiendo también aplicarse a la modelación del diámetro y la altura de árboles. Del mismo modo ha sido parametrizado y comprobado en la predicción del rendimiento de plantaciones forestales de importancia comercial de rápido crecimiento de varias especies incluyendo especies de *Eucalyptus* en países como Australia, Brasil, China, España, Estado Unidos, Finlandia, Gran Bretaña, Portugal, Sudáfrica (Landsberg, Waring, & Coops, 2001; Rodríguez-Suarez, et al., 2010; Sands & Landsberg, 2002), incluyendo *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. grandis*, *E. regnans* y el híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis* (Dye, Jacobs, & Drew, 2004; Fontes et al., 2006). Sin embargo, son pocas las experiencias que se tiene del uso de este

modelo para plantaciones forestales de alta densidad con fines energéticos y la aplicación del modelo en esta modalidad solo se ha reportado por Amichev et al. (2011). El modelo ha sido utilizado para la predicción de la productividad de *Salix* sp y *Populus* sp en plantaciones dendroenergéticas siendo una fuente de información para silvicultores e industriales en Canadá (Amichev, et al., 2011; Amichev, et al., 2010).

El modelo 3PG basado en procesos ha sido ampliamente descrito en estudios previos de calibración y aplicación (Almeida, Landsberg, & Sands, 2004; Coops & Waring, 2001; Coops, Waring, & Landsberg, 1998; Fontes, et al., 2006; Landsberg, Waring, & Coops, 2003; Paul, Booth, Jovanovic, Sands, & Morris, 2007; Tickle, Coops, & Hafner, 2001; Waring, Coops, & Landsberg, 2010). El modelo de crecimiento de plantaciones calcula la radiación fotosintéticamente activa, que se convierte en producción primaria bruta, utilizando el factor de conversión de la eficiencia cuántica del dosel, el cual es limitado por factores ambientales, entre ellos: déficit de presión de vapor, temperatura, heladas y la fertilidad del suelo (Almeida, et al., 2004).

El objetivo de esta publicación es presentar los resultados de la parametrización y validación del modelo 3PG para plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus camaldulensis* en suelos marginales de la Región del Biobío, Chile. Del mismo modo el modelo puede indirectamente ser usado para evaluar aspectos de sustentabilidad de plantaciones dendroenergéticas respecto al carbono y además, puede ser usado como

herramienta para tomar decisiones basadas no solo en el rendimiento presente sino también, en el rendimiento futuro, y posibles implicancias importantes.

## Materiales y Métodos

### Características y ubicación de los ensayos

Un estudio fue establecido en agosto de 2007 en la Región del Biobío, Chile en condiciones de suelo granítico, localizado a 36° 17' Lat Sur, 72° 22' Long Oeste. La precipitación promedio anual evaluada durante el estudio fue de 700 mm, con una temperatura promedio anual de 13,2 °C. El uso anterior correspondió a plantaciones de *Pinus radiata* D. Don que fue cosechada a los 22 años de edad. Un mayor detalle del ensayo se encuentra publicado por Esquivel et al. (2013).

### Datos meteorológicos utilizados.

Los datos meteorológicos utilizados se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada a 40 km del ensayo en el campus Chillán de la Universidad de Concepción, Chile. Los datos incluye todo el período de proyecto. La estación meteorológica está situada en 36° 34 'S; 72° 06' O; 144 msnm. La cual registró valores de precipitación, temperatura, radiación mensuales (Cuadro 1).

Cuadro 1. Promedio mensual de datos meteorológicos de la estación de Chillán utilizado en la calibración del modelo.

Table 1. Monthly average of meteorological data of Chillán station used in model calibration.

Mes	T max	T min	Pp	E pot	R solar	Dp	hela
Enero	28,61	12,15	3,78	7,53	28,25	2	0
Febrero	27,07	10,50	41,68	6,10	25,85	3	0
Marzo	26,01	11,02	14,13	5,21	20,04	3	0
Abril	20,07	6,93	60,17	2,39	12,76	8	0
Mayo	14,01	4,73	71,99	0,67	7,09	7	6
Junio	11,38	3,00	86,69	0,07	5,90	10	7
Julio	11,89	3,20	206,84	0,01	6,20	14	8
Agosto	12,89	0,69	91,20	0,15	10,25	9	16
Septiembre	16,30	4,30	45,53	1,26	13,72	6	2
Octubre	19,50	6,11	48,33	3,27	18,66	7	0
Noviembre	24,00	8,11	0,41	6,66	28,12	1	0
Diciembre	26,67	10,53	20,03	7,47	30,32	4	0

T max = Temperatura máxima (°C), T min = Temperatura mínima (°C), Pp = Precipitación (mm), E pot = Evaporación potencial (mm día<sup>-1</sup>), R solar = Radiación solar (MJm<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>), Dp = Días con lluvia (N°), hela = Días con heladas (N°).

T max = Maximum temperature (° C), T min = Minimum temperature (° C), Pp = Precipitation (mm), E pot = Potential evaporation (mm day<sup>-1</sup>), R solar = solar radiation (MJm<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>), Dp = rain days (N°), hela = Frost days (N°).

## El modelo 3PG.

### Características principales de 3PG.

3PG utiliza cinco submodelos: (1) la producción de biomasa predicha a partir de la radiación absorbida y la eficiencia en el uso de la radiación modificada por factores ambientales; (2) la asignación de biomasa, en componentes acorde a las condiciones de crecimiento y el tamaño del árbol; (3) la mortalidad de los árboles, determinado según la ley de auto-raleo; (4) el cálculo de los parámetros tradicionales como volumen; y (5) el balance de agua del suelo. La ecuación de Penman-Monteith se utiliza para calcular la transpiración mensual. Parámetros específicos de cada especie son esenciales para caracterizar la estructura del dosel, la eficiencia cuántica del dosel, las relaciones que afectan el particionamiento de la biomasa, la densidad básica de la madera, hojarasca y las tasas de rotación de la raíz. Se puede decir que el modelo 3PG es un modelo de crecimiento relativamente simple y flexible basado en procesos (Nightingale et al., 2008).

### Los datos de entrada y salidas.

Para las entradas climáticas necesarias para el modelo 3PG se requieren valores medios mensuales de la radiación solar ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), la media de temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), déficit de presión de vapor atmosférico (mbar), lluvia (mm mensual), y los días de helada (hela en días al mes). El déficit de presión de vapor puede estimarse a partir de  $T_{\text{max}}$  y  $T_{\text{min}}$ , como la mitad de la diferencia entre la presión de vapor saturado a  $T_{\text{max}}$  y  $T_{\text{min}}$ . El modelo 3PG se puede utilizar ya sea datos meteorológicos mensuales reales o promedios mensuales a largo plazo. El uso de las medias es el procedimiento normal a menos que haya un interés particular en eventos específicos, como las sequías.

Otros datos importantes que describen las propiedades físicas del sitio son: latitud, una calificación de fertilidad sitio, el máximo de agua disponible en el suelo, la textura del suelo en términos generales y las condiciones iniciales de la densidad de plantación (número de árboles establecidos, biomasa de follaje, raíz y tallo). Las salidas de 3PG pueden ser valores mensuales o anuales. Incluyen biomasa de tallo, raíz y follaje ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), el índice de área foliar (L), el volumen del fuste ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), el diámetro del tallo promedio a la altura del pecho (cm), una media de incremento de volumen anual ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ), y el número de fustes (N en árboles  $\text{ha}^{-1}$ ). La lista de parámetros para 3PG se pueden encontrar en Sands y Landsberg (2002) y también se han publicado por Fontes et al. (2006).

### Estructura de base de datos y las condiciones del lugar.

Algunos datos fueron tomados de los registros de

desarrollo de la plantación con la medición de las 9 parcelas de muestreo desde 2007 hasta 2011; para los datos de la biomasa de la plantación se utilizó los modelados para esta sitio por Sandoval (2012) los que a su vez fueron utilizados para obtener valores necesarios en la parametrización del modelo como por ejemplo la densidad de la madera específica ( $530 \text{ kg m}^{-3}$ ). La simulación se realizó con tablas de crecimiento y rendimiento hasta de 4 años de edad.

Las relaciones alométricas fueron calculadas para cada densidad por separado utilizando la ecuación de alometría de Landsberg et al. (2003)

$$W_s = p_{\text{const}} Dap^{p_{\text{poder}}}$$

donde:

$W_s$ : Biomasa del árbol (kg);  $P_{\text{const}}$ : Parámetro a estimar;  $Dap$ : Diámetro altura de pecho;  $P_{\text{poder}}$ : Parámetro a estimar.

La biomasa observada se obtuvo de modelos desarrollados para esta plantación para cada época de medición de las variables diámetro y altura. Para la ley de autoraleo se utilizaron los datos de la plantación así como las relaciones entre biomasa de fuste y tallo. Estas se obtuvieron mediante el programa estadístico SAS Versión 9.1(SAS-Institute-Inc, 2000).

Otros parámetros para la especie son obtenidos de la literatura principalmente de Dye et al. (2004). La lista de parámetros utilizados para cada densidad se encuentra en el Cuadro 2.

### Calibración y diseño experimental del ensayo y densidades

Para verificar la parametrización se utilizó la ecuación de eficiencia del modelo: (Nash & Sutcliffe, 1970)

$$FI_i = 1 - \frac{\sum(Y_{\text{obs}} - Y_{\text{est}})^2}{\sum(Y_{\text{obs}} - Y_{\text{pro.}})^2}$$

donde:  $FI_i$ : Índice de eficiencia del modelo

$Y_{\text{obs}}$ : Valores observados de la base de datos;  $Y_{\text{est}}$ : Valores estimados de salida del modelo;  $Y_{\text{pro.}}$ : Promedio de los valores observados.

En la medida que este valor se aproxime a 1 la predicción del modelo mejora, por otra parte valores negativos indican una pobre predicción del modelo. Los datos observados fueron tomados del ensayo que se estableció con un diseño de bloques completos al azar con 3 réplicas. Las dimensiones de cada bloque fueron  $75 \text{ m} \times 75 \text{ m}$  ( $5625 \text{ m}^2$ ), conformado en su interior por nueve unidades experimentales de  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$

Cuadro 2. Parámetros utilizados en el modelo 3PG para cada una de las densidades utilizadas.

Table 2. Parameters used in the 3PG model for each stocking used.

Meaning/comments	5.000	7.500	10000
<b>Biomass partitioning and turnover</b>			
<b>Allometric relationships &amp; partitioning</b>			
Foliage:stem partitioning ratio @ D=2 cm ***	0,53	0,55	0,66
Foliage:stem partitioning ratio @ D=20 cm ***	0,15	0,15	0,15
Constant in the stem mass v. diam. Relationship ***	0,3249	0,247	0,2146
Power in the stem mass v. diam. Relationship ***	1,2888	1,5632	1,5148
Maximum fraction of NPP to roots	0,8	0,8	0,8
Minimum fraction of NPP to roots	0,2	0,2	0,2
<b>Litterfall &amp; root turnover</b>			
Maximum litterfall rate	0,027	0,027	0,027
Litterfall rate at t = 0	0,001	0,001	0,001
Age at which litterfall rate has median value ***	12	12	12
Average monthly root turnover rate	0,015	0,015	0,015
<b>NPP &amp; conductance modifiers</b>			
<b>Temperature modifier (fT)</b>			
Minimum temperature for growth	5	5	5
Optimum temperature for growth	24	24	24
Maximum temperature for growth	36	36	36
<b>Frost modifier (fFRost)</b>			
Days production lost per frost day	0	0	0
<b>Soil water modifier (fSW)</b>			
Moisture ratio deficit for f = 0.5	0,7	0,7	0,7
Power of moisture ratio deficit	9	9	9
<b>Atmospheric CO<sub>2</sub> modifier (fCO<sub>2</sub>)</b>			
Assimilation enhancement factor at 700 ppm	1,4	1,4	1,4
Canopy conductance enhancement factor at 700 ppm	0,7	0,7	0,7
<b>Fertility effects</b>			
Value of 'm' when FR = 0	0	0	0
Value of 'fNutr' when FR = 0	1	1	1
Power of (1-FR) in 'fNutr'	0	0	0
<b>Age modifier (fAge)</b>			
Maximum stand age used in age modifier	50	50	50
Power of relative age in function for fAge	4	4	4
Relative age to give fAge = 0.5	0,95	0,95	0,95
<b>Stem mortality &amp; self-thinning</b>			
Mortality rate for large t	1	1	1
Seedling mortality rate (t = 0) ***	4,1	4,1	2,7
Age at which mortality rate has median value ***	1,5	1,5	1,5
Shape of mortality response ***	1,5	1,5	1,5
Max. stem mass per tree @ 1000 trees/hectare	300	300	300
Power in self-thinning rule ***	1,022	1,0187	1,0137
Fraction mean single-tree foliage biomass lost per dead tree	0	0	0
Fraction mean single-tree root biomass lost per dead tree	0	0	0

(Continúa en la siguiente página)

Meaning/comments	5.000	7.500	10000
Fraction mean single-tree stem biomass lost per dead tree	0	0	0
<b>Canopy structure and processes</b>			
<b>Specific leaf area</b>			
Specific leaf area at age 0	7,6	7,6	7,6
Specific leaf area for mature leaves	2,5	2,5	2,5
Age at which specific leaf area = (SLA0+SLA1)/2	2	2	2
<b>Light interception</b>			
Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	0,55	0,55	0,55
Age at canopy cover ***	2	2	2
Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	0,15	0,15	0,15
LAI for maximum rainfall interception	0	0	0
<b>Production and respiration</b>			
Canopy quantum efficiency	0,06	0,06	0,06
Ratio NPP/GPP	0,47	0,47	0,47
<b>Conductance</b>			
Minimum canopy conductance	0	0	0
Maximum canopy conductance	0,03	0,03	0,03
LAI for maximum canopy conductance	3,33	3,33	3,33
Defines stomatal response to VPD	0,05	0,05	0,05
Canopy boundary layer conductance	0,2	0,2	0,2
<b>Wood and stand properties</b>			
<b>Branch and bark fraction (fracBB)</b>			
Branch and bark fraction at age 0 ***	0,106	0,106	0,106
Branch and bark fraction for mature stands ***	0,123	0,123	0,123
Age at which fracBB = (fracBB0+fracBB1)/2	2	2	2
<b>Basic Density</b>			
Minimum basic density - for young trees ***	0,530	0,530	0,530
Maximum basic density - for older trees ***	0,530	0,530	0,530
Age at which rho = (rhoMin+rhoMax)/2	4	4	4
<b>Stem volumen</b>			
Constant in the stem volume relationship	0	0	0
Power of DBH in the stem volume relationship	0	0	0
Power of stocking in the stem volume relationship	0	0	0
<b>Conversion factors</b>			
Intercept of net v. solar radiation relationship	-90	-90	-90
Slope of net v. solar radiation relationship	0,8	0,8	0,8
Molecular weight of dry matter	24	24	24
Conversion of solar radiation to PAR	2,3	2,3	2,3

Basados en los parámetros calculados y publicados por Dye et al., (2004)  
Based on parameters calculated and published by Dye et al., (2004)

\*\*\* Generados con datos del proyecto.  
\*\*\* Generated with project data.

(625 m<sup>2</sup>), cada una. Cada unidad experimental consideró una zona de amortiguamiento de al menos 5 metros y una parcela interna de tratamiento de máximo 20 m x 20 m. Los tratamientos consideraron densidades de plantación de 5.000 árboles ha<sup>-1</sup> (1,41 x 1,41 m), 7500 árboles ha<sup>-1</sup> (1,15 x 1,15 m) y 10000 árboles ha<sup>-1</sup> (1,00 x

1,00 m) y tres especies por sitio a pesar de que para esta parametrización solo se utilizó la especie *Eucalyptus camaldulensis*. El crecimiento de los árboles fue evaluado en la parcela interna dentro de la unidad experimental. La parcela de medición fue de 49 árboles. Las mediciones de variables dasométricas correspondieron a los 2, 4, 11,

16, 23, 28, 36, 40 y 48 meses de edad de la plantación. Las muestras destructivas para la determinación de la biomasa fueron tomadas los 11, 23, 36 y 48 meses de edad de la plantación.

## Resultados

A pesar de que existen parámetros para esta especie en particular los mismos no fueron desarrollados para este tipo de plantaciones de alta densidad por lo que se requirió calcular algunos de los parámetros necesarios en el modelo, estos fueron relacionados con la alometría y fueron calculados a partir de datos de la plantación por separado para cada una de las densidades, y ajustaron de manera correcta en cada caso presentando variaciones entre las densidades propias de las diferencias observadas y evaluadas en las tres densidades. Una muestra de ello se puede observar en la Figura 1 donde se evidencia los cambios entre las densidades.

Con la lista de parámetros del Cuadro 2, se procedió a realizar las simulaciones para el modelo. En la Figura 2 se pueden apreciar los gráficos para algunas de las variables modeladas. Para el caso de la biomasa de fuste y el diámetro se puede observar una gran concordancia entre ambas variables de la plantación, así mismo la predicción del modelo ajustó mejor entre mayor fue la densidad, realizando una sobreestimación de la biomasa del fuste y del diámetro para la densidad de 5000  $\text{árb ha}^{-1}$  y una sobreestimación menor para los 7500  $\text{árb ha}^{-1}$ . Para los 10000  $\text{árb ha}^{-1}$  se observa un modelación que concuerda con los datos.

Para el caso de la biomasa foliar y la mortalidad modeladas se puede observar que la estimación de la mortalidad subestima el número real de árboles en no más de 144  $\text{árb ha}^{-1}$ , para el peor de los casos, en la densidad de 10 000  $\text{árb ha}^{-1}$ . Por otra parte la estimación de biomasa foliar sobreestimó en todas las densidades al compararla con los datos observados (Figura 3).

Al evaluar la eficiencia de la estimación realizada por el modelo, la sobrevivencia que predicha es muy precisa, en todas las densidades los valores son positivos y en las densidad de 5000 y 10000  $\text{árb ha}^{-1}$  el valor de eficiencia es 1 lo que demuestra un buen ajuste. En la predicción del diámetro solamente se obtiene un valor positivo en 10000  $\text{árb ha}^{-1}$  con una diferencia entre lo estimado y lo observado menor a 0,5 cm de diámetro. Tal y como se observó en la Figura 3 la biomasa de follaje fue sobreestimada en todos los casos. En la biomasa de fuste, conforme aumentó la densidad mejoró la predicción del modelo. En algunas variables la diferencia entre lo observado y lo modelado fue de una magnitud considerada, llegando el modelo al doble de lo observado (Cuadro 3).

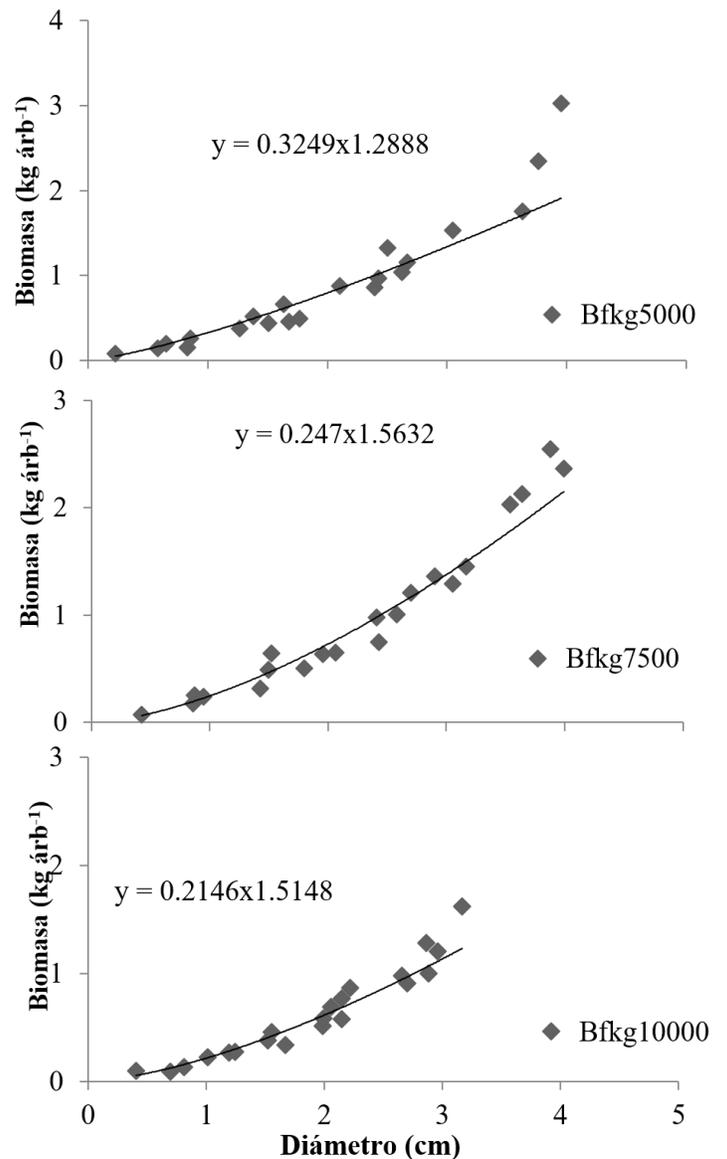


Figura 1. Relación entre la biomasa del árbol ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ) y el diámetro altura de pecho (cm) de la especie *E. camaldulensis* para cada una de las densidades (5000, 7500 y 10000).

Figure 1. Relationship between tree biomass ( $\text{kg arb}^{-1}$ ) and diameter at breast height (cm) of *E. camaldulensis* for each stocking (5000, 7500 and 10000).

## DISCUSIÓN

Con datos de alometría y demás parámetros calculados en base a las observaciones de campo y mediciones realizadas a plantaciones de alta densidad se logró obtener una parametrización del 3PG donde se logró modelar algunas variables de la plantación, sin embargo, las modelaciones variaron en su eficiencia entre las densidades evaluadas, a pesar de que los procedimientos de parametrización, por ejemplo para la alometría, fueron realizados de la misma manera para cada una de las densidades. Fontes et al., (2006)

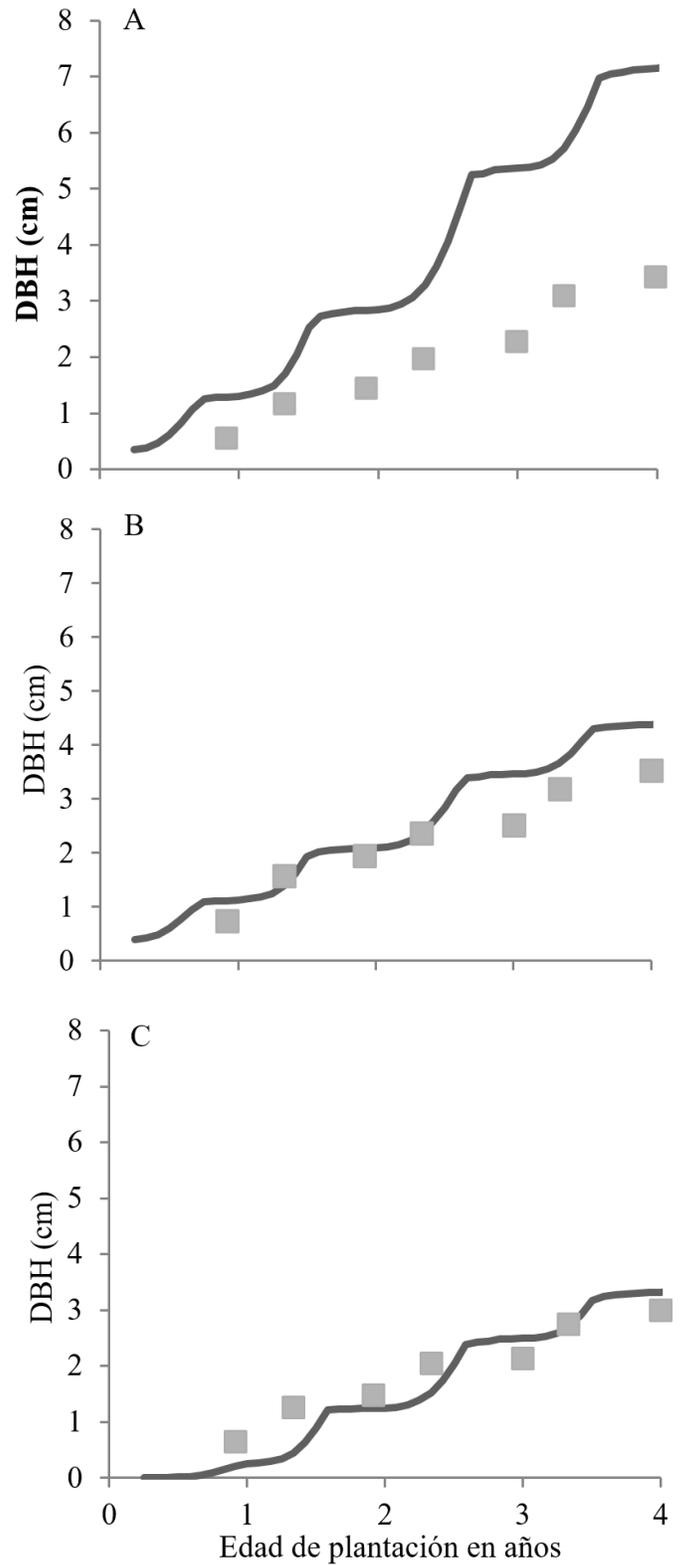
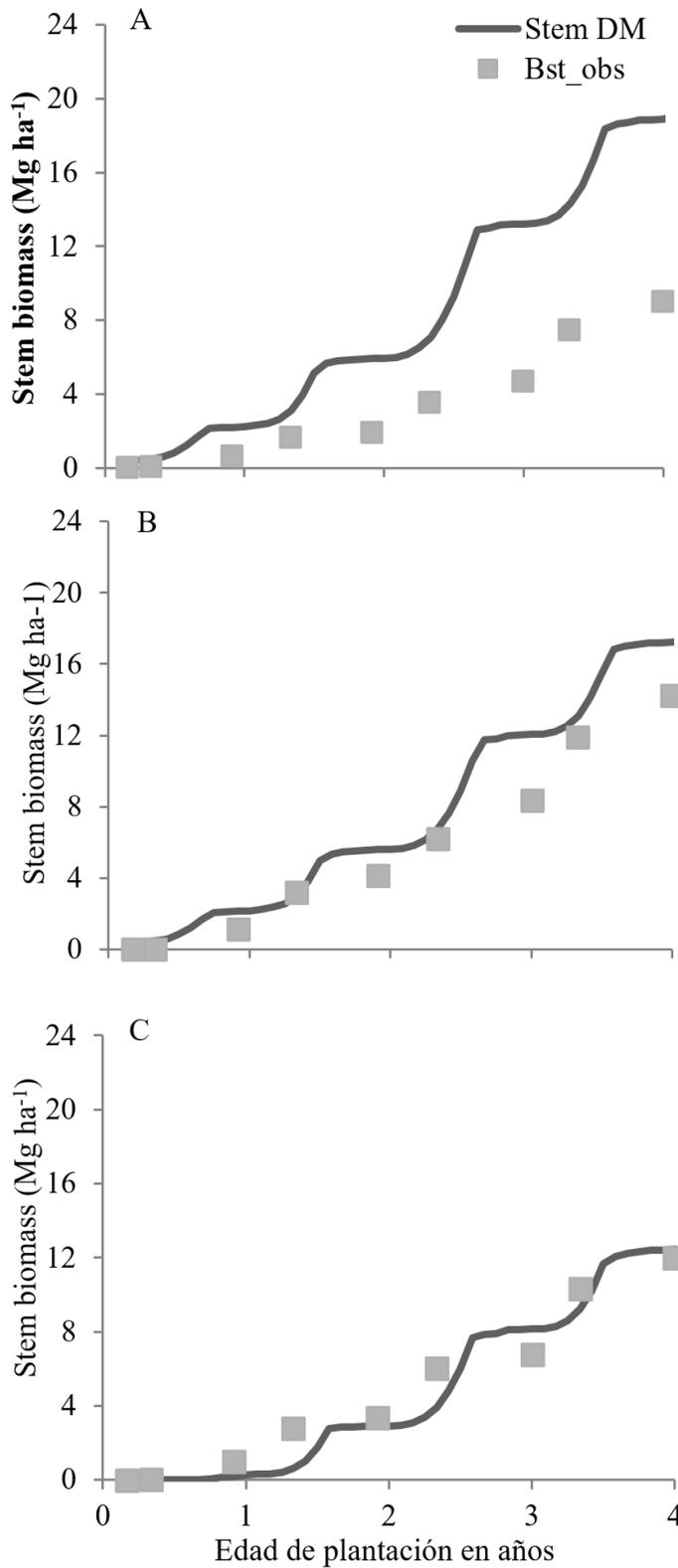


Figura 2. Resultados de la modelación en 3PG de la biomasa de fuste ( $Mg\ ha^{-1}$ ) y Dap (cm) para las densidades de 5000 (A), 7500 (B) y 10000 (C)  $\text{arb}\ ha^{-1}$ .

Figure 2. Stem biomass ( $Mg\ ha^{-1}$ ) and dbh (cm) modeling results using 3PG for 5 000 (A), 7500 (B) and 10000 (C)  $\text{arb}\ ha^{-1}$  stockings.

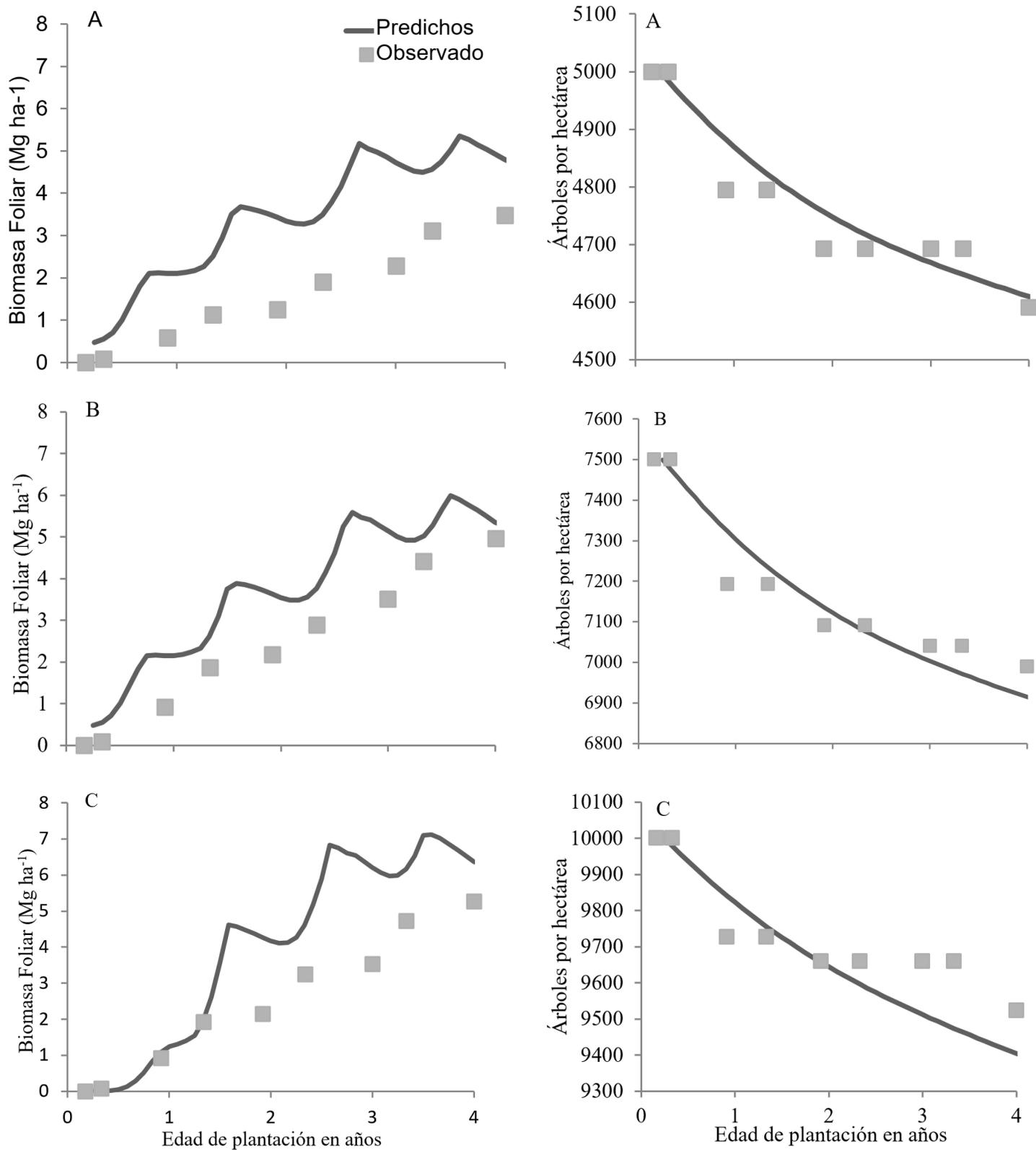


Figura 3. Resultados de la modelación en 3PG de la biomasa total de follaje ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y Mortalidad ( $\text{arb ha}^{-1}$ ) para las densidades de 5000 (A), 7500 (B) y 10000 (C)  $\text{arb ha}^{-1}$ .

Figure 3. Foliage biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) and mortality ( $\text{arb ha}^{-1}$ ) modeling results using 3PG for 5000 (A), 7500 (B) and 10000 (C)  $\text{arb ha}^{-1}$  stockings.

**Cuadro 3.** Datos observados y predichos por el modelo 3PG y la eficiencia del modelo; a los 4 años de edad de las plantaciones dendroenergéticas para las distintas densidades analizadas.

**Table 3.** Observed and predicted data by the 3PG model and modeling efficiency for wood energy plantations at 4 years old for the three different stockings.

Densidad analizada		Biomasa (Mg ha <sup>-1</sup> )		Diámetro (cm)	Sobrevivencia (árb ha <sup>-1</sup> )
		Fuste	Follaje		
5000	Observado	8,95	3,48	3,41	4591
	Predicho	19,48	4,56	7,33	4597
	Eficiencia	-7,46	-3,78	-10,77	1,000
7500	Observado	14,20	4,96	3,52	6989
	Predicho	17,80	5,14	4,49	6895
	Eficiencia	0,22	-0,39	-0,32	0,832
10000	Observado	11,99	5,26	3,00	9523
	Predicho	13,03	6,15	3,43	9378
	Eficiencia	0,810	-1,94	0,33	1,000

evaluaron plantaciones de *Eucalyptus globulus* con densidades desde los 1111 árb ha<sup>-1</sup> hasta los 5000 árb ha<sup>-1</sup> obteniendo resultados que variaron en las densidades, ellos lo explican en parte por los cambios en la alometría entre las diferentes densidades de plantación. Por esta razón las parametrizaciones se realizaron individualmente para cada densidad utilizando la alometría propia de cada una.

Mediante la parametrización realizada el modelo 3PG se lograron estimaciones de biomasa de fuste y de diámetro fueron mejores para las densidades de 10000 árb ha<sup>-1</sup> que en la densidad de 5000 árb ha<sup>-1</sup>, cabe destacar que posterior a la plantación solamente se realizó un control de malezas el cual se realizó cerca los dos años de edad de la plantación. La distribución que estas malezas tenía en el campo era variable con un aumento lógico en las densidades menores por lo que se podría decir que el modelo estimó al diámetro y la biomasa que esta plantación hubiera alcanzado si las malezas hubieran sido controladas más adecuadamente. Por lo anterior se podría decir que el efecto de la maleza afectó el diámetro de los árboles llegando a menos de la mitad del diámetro que potencialmente estos árboles habrían llegado y esto afectó la biomasa del fuste de igual manera. Este efecto de la maleza en este tipo de plantaciones ya ha sido reportado y se indica que las pérdidas podrían ser mayores al 30 %.(Mead, 2005).

En este ensayo la especie que presentó menor mortalidad fue *E. camaldulensis*, la sobrevivencia de la especie fue estimada por el modelo con un diferencia menor al 2 % del total de los árboles, la densidad de plantación ha sido mencionada como una de las variables más importantes

a implementar este tipo de plantaciones, esto por su efecto en los recursos del sitio, así mismo la densidad de plantación influye en el rendimiento de la plantación y en el diámetro de los árboles. En este caso la poca eficiencia mostrada por el modelo en la estimación de la biomasa de fuste es un error en la estimación del diámetro y no en la densidad de árboles creciendo en determinado momento en la plantación.

Por otra parte la biomasa foliar también fue sobreestimada por el modelo esta podría estar relacionada a su vez con la sobreestimación de la biomasa de fuste, ya que el modelo no contempla la competencia por recursos que las malezas podría estar provocando en el sitio, claramente muchas con una cantidad de recursos disminuida por las malezas, la cantidad de biomasa foliar se vería limitada por lo que al tener menos follaje se tendrá también menos biomasa, de igual manera una consecuencia de una menor biomasa foliar es un menor rendimiento en el diámetro de la plantación.

El poder modelar plantaciones de alta densidad con 3PG provee una nueva fuente de información para plantaciones dendroenergéticas permitiendo estimar su rendimiento. Sin embargo, con el objetivo de obtener los rendimientos que el modelo predice debería de realizarse un mantenimiento a estas plantaciones que controle las malezas de una mejor manera. Se ha reportado que una variación de los recursos podría afectar la modelación en el corto plazo (Almeida et al., 2010), claramente las malezas no solo compiten por los recursos por lo que el modelo permitió conocer el rendimiento de plantaciones dendroenergéticas manejadas intensivamente.

## Conclusiones

Con el cálculo de parámetros alométricos en plantaciones dendroenergéticas se puede parametrizar el modelo 3PG y a la vez obtener información del rendimiento y la mortalidad que estas plantaciones presentan.

El modelo no contempla la presencia de malezas como un factor a considerar por lo que por un lado exige un control adecuado de las mismas si se desea alcanzar los rendimientos predichos por el modelo.

La sobrevivencia modelada presentó errores menores al 2 % del número de árboles, esta variable es de suma importancia en este tipo de plantaciones por lo que la información brindada por el modelo es clave en el manejo silvícola intensivo requerido en este caso.

Al contrastar los valores predichos y observados en biomasa foliar, biomasa de fuste y diámetro de estas plantaciones se puede evaluar el efecto que las malezas pueden tener en una plantación donde se podría haber perdido hasta el 50 % de la productividad del sitio.

## Agradecimientos

Al programa de doctorado de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, al Proyecto INNOVA Biobío N° 06-PC S1-33 por el financiamiento; a la becas al Programa de Becas para Estudios de Doctorado para Estudiantes Extranjeros en Chile de CONICYT, Chile; a la beca para estudios de postgrado de la OEA y a la beca del Programa de Formación de Recurso Humano en Ciencia y Tecnología del MICIT, Costa Rica. Al Laboratorio de Suelos Nutrición y Productividad Forestal, y a la Cooperativa de Producción Forestal y a los compañeros por su colaboración especialmente al Sr. Luis Castro y finalmente también a la Ing. Xiomara Murillo Phillip.

## Referencias

Almeida, A. C., Landsberg, J. J., & Sands, P. J. (2004). Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 179-195. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.029>

Almeida, A. C., Siggins, A., Batista, T. R., Beadle, C., Fonseca, S., & Loos, R. (2010). Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on *Eucalyptus* plantation production with 3-PG, a process-based growth model. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1730-1740. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.008>

Amichev, B. Y., Hangs, R. D., & Van Rees, K. C. J. (2011). A novel approach to simulate growth of multi-stem willow in bioenergy production systems with a simple process-based model (3PG). *Biomass & Bioenergy*, 35(1), 473-488. doi:

10.1016/j.biombioe.2010.09.007

Amichev, B. Y., Johnston, M., & Van Rees, K. C. J. (2010). Hybrid poplar growth in bioenergy production systems: Biomass prediction with a simple process-based model (3PG). *Biomass & Bioenergy*, 34(5), 687-702. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.01.012

Aylott, M. J., Casella, E., Tubby, I., Street, N. R., Smith, P., & Taylor, G. (2008). Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK. [Article]. *New Phytologist*, 178(2), 358-370. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02396.x

Berndes, G., Hoogwijk, M., & van den Broek, R. (2003). The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass & Bioenergy*, 25(1), 1-28. doi: 10.1016/s0961-9534(02)00185-x

Coops, N. C., & Waring, R. H. (2001). The use of multiscale remote sensing imagery to derive regional estimates of forest growth capacity using 3-PGS. *Remote Sensing of Environment*, 75(3), 324-334.

Coops, N. C., Waring, R. H., & Landsberg, J. J. (1998). Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management*, 104(1-3), 113-127. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00248-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00248-X)

Dye, P. J., Jacobs, S., & Drew, D. (2004). Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantation stands in Zululand, South Africa. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 197-218. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.030>

Esquivel, E., Rubilar, R., Sandoval, S., Acuna, E., Cancino, J., Espinosa, M., & Muñoz, F. (2013). Efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la región de Biobío, Chile. [Article]. *Revista Arvore*, 37(6), 1135-1144.

Feikema, P. M., Morris, J. D., Beverly, C. R., Collopy, J. J., Baker, T. G., & Lane, P. N. J. (2010). Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+forest growth model. *Forest Ecology and Management*, 260(5), 663-678. doi: 10.1016/j.foreco.2010.05.022

Fontes, L., Landsberg, J., Tomé, J., Tomé, M., Pacheco, C. A., Soares, P., & Araujo, C. (2006). Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(12), 3209-3221.

Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95(3), 209-228. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1)

Landsberg, J. J., Waring, R. H., & Coops, N. C. (2001). The 3-PG forest model: Matters arising from evaluation against plantation data from different countries. *Models for the Sustainable Management of Temperate Plantation Forests*, Proceedings(41), 31-43/142.

Landsberg, J. J., Waring, R. H., & Coops, N. C. (2003). Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide

- range of forest types. *Forest Ecology and Management*, 172(2-3), 199-214. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00804-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00804-0)
- Mead, D. J. (2005). Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass & Bioenergy*, 28(2), 249-266. doi: 10.1016/j.biombioe.2004.08.007
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nightingale, J. M., Hill, M. J., Phinn, S. R., Davies, I. D., Held, A. A., & Erskine, P. D. (2008). Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests: I. Parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests. *Forest Ecology and Management*, 254(2), 107-121. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.041>
- Paul, K. I., Booth, T. H., Jovanovic, T., Sands, P. J., & Morris, J. D. (2007). Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia *Forest Ecology and Management*, 243, 237-247.
- Richardson, J. (2006). Sustainable production systems for bioenergy: Impacts on forest resources and utilization of wood for energy - Preface. *Biomass & Bioenergy*, 30(4), 279-280. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.07.004
- Richardson, J., & Verwijst, T. (2007). Multiple benefits from sustainable bioenergy systems: Proceedings of a joint workshop of IEA bioenergy task 30 and task 31, August 2005, Perth, Western Australia - Preface. *Biomass & Bioenergy*, 31(9), 599-600. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.06.024
- Rodriguez-Suarez, J. A., Soto, B., Iglesias, M. L., & Diaz-Fierros, F. (2010). Application of the 3PG forest growth model to a Eucalyptus globulus plantation in Northwest Spain. *European Journal of Forest Research*, 129(4), 573-583. doi: 10.1007/s10342-010-0355-6
- Sandoval, S. P. (2012). Modelación del Crecimiento y Rendimiento en Biomasa Aérea de Ensayos Dendroenergéticos. Doctor, Universidad de Concepción, Concepción Chile.
- Sands, P. J., & Landsberg, J. J. (2002). Parameterisation of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. *Forest Ecology and Management*, 163(1-3), 273-292.
- Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M. H., & Parrish, D. J. (2006). Potential soil carbon sequestration and CO<sub>2</sub> offset by dedicated energy crops in the USA. [Review]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25(5), 441-472. doi: 10.1080/07352680600961021
- SAS-Institute-Inc. (2000). SAS/STAT User's Guide: Version 8 (Vol. 1, 2 and 3). North Carolina, U.S.A.: SAS Institute Inc.
- Tickle, P. K., Coops, N. C., & Hafner, S. D. (2001). Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. *Forest Ecology and Management*, 152(1-3), 275-291.
- Waring, R. H., Coops, N. C., & Landsberg, J. J. (2010). Improving predictions of forest growth using the 3-PGS model with observations made by remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1722-1729. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.036>