

## Uso del modelo 3-PG para la predicción de biomasa de eucalipto en

Jalisco, México

Use of 3-PG model to predict eucalypt biomass in Jalisco, México

Aurelio Guevara-Escobar<sup>1</sup>, Mónica Cervantes-Jiménez<sup>1\*</sup> y Humberto Suzán-Azpiri<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ciencias Naturales. Laboratorio de Ecología. Juriquilla, Querétaro, México.

\*Autor de correspondencia. monica.cervantes@uaq.mx

### Resumen

La modelación de la biomasa en plantaciones forestales es una alternativa para cuantificar el carbono almacenado en la vegetación. Las predicciones son importantes para las decisiones productivas o para los esfuerzos de mitigación de cambio climático. Un aspecto importante es la relación de la humedad de suelo ( $\theta$ ) con la biomasa. Se usó el modelo 3-PG para determinar la producción de biomasa en distintos escenarios de  $\theta$  en una plantación de *Eucalyptus globulus* en un clima subtropical. De 2007 a 2009 se midió  $\theta$  en el perfil 0 m -1.8 m, índice de área foliar y diámetro a la altura del pecho. Se midió la precipitación y se estimaron la evapotranspiración de cultivo y potencial para un año con base en el balance hídrico, con valores de 959 mm, 514.3 mm y 1303 mm respectivamente. La biomasa modelada no fue afectada por  $\theta$  al inicio del año, pero sí por la  $\theta$  mínima del suelo. Los modelos para el índice de área foliar y la evapotranspiración sobreestimaron los datos observados. La biomasa a los ocho años se estimó en  $165.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , de la cual,  $23.1 \text{ Mg ha}^{-1}$  se almacena en raíces y  $59.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  en biomasa aérea. Concluyendo, los datos de la humedad mínima del suelo son necesarios para modelar el diámetro a la altura del pecho y es preferible el ensamble de modelos en comparación con escoger un solo modelo o usar el promedio de ellos.

**Palabras clave:** almacén de carbono; área foliar; evaporación; plantaciones comerciales.

## Abstract

Biomass modeling in forest plantations is an alternative to quantify carbon stored in vegetation. Predictions are important for management decisions or efforts to mitigate climate change. An important relationship is that of soil moisture ( $\theta$ ) with biomass. The 3-PG model was used to predict biomass production in different scenarios of  $\theta$  in a *Eucalyptus globulus* plantation in subtropical climate. From 2007 to 2009, we measured  $\theta$  in the 0 m - 1.8 m soil profile, leaf area index and the diameter at breast height. Precipitation was registered and crop and potential evapotranspiration were estimated for one year based on the water balance, with values of 959 mm, 514.3 mm and 1303 mm, respectively. The predictions of leaf area index and evapotranspiration overestimate observed data. At eight years, biomass was modeled as 165.5 Mg ha<sup>-1</sup>, of which 23.1 Mg ha<sup>-1</sup> is stored in roots and 59.5 Mg ha<sup>-1</sup> in aboveground biomass. In conclusion, minimum soil moisture data are necessary to model diameter at breast height and it is desirable to assemble models instead of selecting a single model or using the average of them.

**Keywords:** carbon stock; leaf area; evaporation; commercial plantations.

## INTRODUCCIÓN

El género *Eucalyptus* se compone de más de 700 especies y muchas de ellas se han distribuido en el mundo, debido a las buenas propiedades de la madera y su rápido crecimiento (Brooker, 2000). En México el eucalipto se introduce desde el siglo XIX pero se cuestiona su impacto en el ciclo del agua, efecto alelopático y sobre la degradación del suelo (Food and Agriculture Organization [FAO], 1995; Ruiz, Rivero, Alcalá y Espinoza, 2006; Vega y Baez, 2016). Sin embargo, el uso de agua por los árboles depende de la tasa de crecimiento y de sus estrategias de defensa ante el estrés (Smith, 2015), siendo entonces relativo el uso del recurso por cada especie

(Dvorak, 2012; Smith, 2015).

Después de la radiación, el agua es el principal recurso limitante para el crecimiento vegetal. El agua debe estar disponible en el suelo para ser aprovechada por las plantas, además de los aportes dados por la lluvia, el riego o el manto freático superficial, las características fisicoquímicas del suelo pueden alterar su disponibilidad (salinidad, textura arcillosa, etc). La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo está dada por su profundidad, su contenido de materia orgánica, su textura y estructura, entre otros. Por otra parte, una planta es competitiva en la medida que pueda vencer un potencial hídrico con un alto valor absoluto, sea fotosintéticamente eficiente en el uso de agua y sus raíces puedan explorar un gran volumen de suelo (Kramer y Boyer, 1995).

Las buenas prácticas de manejo silvícola son importantes para atender la densidad de plantación, fertilización o cosecha y controlar el efecto negativo sobre la recarga hídrica, erosión y competencia entre especies (Wilkinson, Schofield y Kanowski, 2014). En este sentido, la decisión de plantar una especie forestal en un sitio específico obedece a la compatibilidad entre las características de la especie y el medio biofísico del sitio; que puede comprobarse o investigarse mediante modelos de crecimiento, parcelas de introducción, estudios de caso o la evaluación de la producción forestal.

El crecimiento y uso de agua pueden predecirse usando modelos de productividad forestal basados en los procesos fisiológicos que controlan el crecimiento, como son la transpiración, fotosíntesis, nutrición, fenología, etc. (Landsberg y Waring, 1997). Un modelo es una representación de la realidad, pero al basarse en los procesos, los modelos pueden mejorarse con base en el entendimiento y medición de las variables que determinan los procesos fisiológicos. La utilidad de un modelo radica en seguir representando la realidad cuando cambia el valor de

variables de importancia para su funcionamiento, variables denominadas forzantes. Así, un modelo basado en procesos puede brindar estimados con incertidumbre tolerable no solo en el sitio original donde se propuso, sino en condiciones diversas.

En este sentido, el modelo 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth) es un modelo basado en procesos, usado para el manejo forestal, es simple y de libre acceso, se ha aplicado a especies de *Pinus* (Bryars *et al.*, 2013; Chan *et al.*, 2018), pero particularmente se ha enfocado a eucaliptos; *Eucalyptus globulus* y *E. grandis* (Sands, 2004). El crecimiento de *E. globulus* se ha calibrado en 3-PG como función de variables alométricas, estructura y procesos del dosel, tasas de conversión de energía, conductancia y respuesta estomática, entre otras (Sands y Landsberg, 2002). Además, el modelo 3-PG utiliza variables ambientales para determinar el estado inicial del sistema y entonces predice el crecimiento y la función de la plantación hasta el fin del turno (Vega-Nieva *et al.*, 2013).

Este modelo es atractivo porque necesita menos datos en comparación con otros modelos, realiza cálculos sobre la producción primaria usando un submodelo biofisiológico de tipo mecanístico y también usa relaciones empíricas, para asignar el carbono a las reservas de biomasa (aérea o subterránea), dependiendo de las condiciones ambientales de crecimiento (Almeida, Landsberg y Sands, 2004; Almeida *et al.*, 2004).

Por otra parte, los modelos empíricos de crecimiento y producción son una herramienta tradicional para el manejo forestal, porque usan datos sencillos para medir la biomasa (Zianis y Mencuccini, 2004). Sin embargo, la capacidad predictiva de estos modelos disminuye cuando las condiciones ambientales o el manejo cambian, porque se basan en el supuesto de estabilidad climática y ambiental (Almeida *et al.*, 2010). Por simplicidad, pueden incorporarse relaciones empíricas dentro de un modelo basado en procesos, con lo que se tendría un modelo híbrido.

Cada herramienta de modelación ofrece una representación del desempeño o función, resultando atractivo combinar las predicciones de manera consensuada y probabilística (Araújo y New, 2007). La combinación o ensamble de modelos se usa en distintas circunstancias, por ejemplo, para predecir el área de distribución potencial de una especie o para la predicción de la temperatura global debido al cambio climático (Klesse *et al.*, 2018; Pearson y Dawson, 2003). Al valorar escenarios múltiples y ponderarlos en cuanto a su probabilidad de ocurrencia se reduce la incertidumbre (Beaumont, Hughes y Pitman, 2008). No obstante, cualquier modelo difiere de la realidad y, en la mayoría de los casos, es posible obtener modelos competitivos en su habilidad para representar aspectos claves del sistema (Araújo y New, 2007).

## **Objetivos**

En el presente estudio la hipótesis fue probar el modelo 3-PG como representación de variables medidas en una plantación de *E. globulus* durante tres años en Jalisco, México. Un primer objetivo fue determinar el efecto de la humedad mínima del suelo sobre la modelación de la biomasa de *E. globulus* con el modelo 3-PG. Un segundo objetivo fue considerar la variabilidad ambiental anual y generar un ensamble de modelos, cada modelo basado en datos ambientales medidos en distinto año y comparar contra datos observados del diámetro a la altura del pecho.

## **Materiales y métodos**

### *Sitio de estudio*

El trabajo se realizó en el Rancho las Agujas en el municipio de Zapopan, Jalisco (N 20° 45' 39.6", W 103° 32' 33.5" y 1640 m de altura sobre el nivel del mar). El clima es subtropical, con lluvias en verano con una media anual de 816 mm, temperatura media de 23.5 grados °C, máxima de 35 °C y mínima de 5.4 °C. De 2007 a 2009 se realizaron mediciones en dos bloques de pastizal

de *Chloris gayana* (Kunth) de 18 ha cada uno plantados con *E. globulus* en el 2004. La densidad de plantación fue de 950 ha<sup>-1</sup> a un espaciamiento de 3 m × 3.5 m. En marzo del 2007 el rodal se caracterizó por una altura de 7 m ± 1 m, diámetro a la altura del pecho (DAP) de 13.4 cm ± 7 cm, área basal de 13.4 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y mortalidad de 3%. La pendiente del sitio fue menor a 2%, los suelos profundos, de textura migajón-arenosa, sin evidencia de erosión y clasificados como Feozem háplico asociado a Regosol eútrico. En el estrato 0 mm - 75 mm el contenido de materia orgánica fue de 1.5%, el pH de 5.2 y la densidad aparente de 0.9 Mg m<sup>3</sup>. En el sitio se encontró un pozo artesiano con un espejo de agua a 15 m, considerando ésta la profundidad del manto freático, quedando fuera del alcance de los eucaliptos.

#### Variables medidas

Se midió dos veces al año el DAP (cm) y el Índice de Área Foliar (IAF), se muestrearon los individuos en tres parcelas de 380 m<sup>2</sup> en cada bloque ( $n=6$ ). No se consideraron en la modelación los árboles defectuosos, con diámetro a la altura del pecho menor a 8 cm o con bifurcaciones. El IAF del eucalipto se midió con un analizador de dosel LI-2000 (Li-cor Inc.). Las mediciones se realizaron en hora crepuscular en cada una de las parcelas obteniéndose tres mediciones en un transecto de 1.5 m perpendicular a las hileras de árboles ( $n=6$ ). El registro de referencia se obtuvo con otro LI-2000 ubicado fuera de la influencia de los árboles y con registro automático. Los valores de IAF obtenidos con el LI-2000 se ajustaron con un factor de 1.51 (Battaglia, Cherry, Beadle, Sands y Hingston, 1998).

Las variables ambientales se midieron dentro de la plantación y lejos de la influencia de los árboles. Con multisensores WXT510 (Vaisala Inc.) se registró cada 20 minutos la precipitación pluvial acumulada (P), humedad relativa (Hr), presión atmosférica (Pa), temperatura del aire (Ta), velocidad y dirección de viento (Vv y Dv, respectivamente). La radiación se midió con un piranómetro LI 200X (Campbell Scientific Inc.). La evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) en 2007

y 2008 se estimó usando la ecuación Penman-Monteith (Allen, Pereira, Raes y Smith, 1998). Cada 20 minutos se registró el contenido de agua del suelo ( $\theta$ , % v/v) con sondas de reflectometría modelo CS-216 (Campbell Scientific Inc.) instaladas horizontalmente a 0.1 m, 0.2 m, 0.4 m, 0.8 m, 1.2 m y 1.8 m de profundidad. El contenido de  $\theta$  como lámina (mm) se integró en función del volumen del suelo en el estrato 0 m - 1.8 m y se calculó el cambio diario en  $\theta$  ( $\Delta\theta$ ).

La evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) se determinó con un balance hídrico para un intervalo de tiempo igual a un mes:  $P = ET_c \pm \Delta\theta$ , donde  $P$  es la precipitación (mm). El cálculo se realizó de abril del 2007 a marzo de 2008. La profundidad del perfil se determinó tomando la experiencia de Almeida, Soares, Landsberg y Rezende (2007) para *E. grandis* de siete años de edad en donde la extracción de agua fue hasta 1.6 m, según sus mediciones con sonda de neutrones. En el balance se consideraron como mínimas las contribuciones del drenaje y escurrimiento superficial. En este balance se incluyeron las pérdidas por intercepción de la lluvia debidas al dosel del eucalipto y del sotobosque de pasto. El coeficiente del cultivo ( $kc$ ) se calculó como el cociente de  $ET_c / ET_0$  y el índice de humedad climática (IHC) como  $P / ET_0$  (White, Battaglia, Ren y Mendham, 2016).

### Modelación

El modelo 3-PG usa como condiciones iniciales para la simulación: a) datos del estado del sitio, b) datos de inicialización para la plantación y c) datos climáticos. Los valores de los parámetros utilizados en la modelación fueron los definidos por defecto en 3-PG para *E. globulus*. El resultado de la modelación son predicciones de distintas variables durante un periodo de crecimiento a intervalos mensuales o anuales. Las variables modeladas fueron DAP, IAF,  $ET_0$ , Incremento Medio Anual (IMA), biomasa total, aérea y de raíces. Estas variables fueron comparadas con las mediciones en campo para explorar la capacidad del modelo 3-PG. Finalmente, la biomasa se multiplicó por un factor de 0.5 para estimar el contenido de carbono (Návar, González y Graciano, 2005).

## Datos de estado del sitio

Las variables para caracterizar el estado del sitio son la latitud, la fertilidad del suelo, la textura del suelo, la humedad máxima y mínima del suelo ( $\theta_{\max}$  y  $\theta_{\min}$ , mm). La fertilidad del suelo (FR) es un atributo cualitativo con valores de 0 a 1 y ponderado de acuerdo con limitantes en: fertilidad (0.4), agua (0.2), oxígeno (0.1), manejo (0.2) y topografía (0.1, Almeida *et al.* 2010). Para el sitio de estudio se valoraron las limitantes como:  $FR = 0.4 \times 0.8 + 0.2 \times 0.4 + 0.1 \times 1 + 0.2 \times 0.8 + 0.1 \times 1 = 0.76$ . Los valores de  $\theta_{\max}$  y  $\theta_{\min}$  se obtuvieron con los valores extremos para la lámina de agua contenida en el estrato 0 m - 1.8 m durante el periodo de tres años.

## Datos de inicialización

Las variables de inicialización de la plantación son: la especie de árbol, la fecha de plantación, la fecha inicial de modelación, la duración de la rotación, la densidad de plantación, la humedad del suelo al inicio de la simulación ( $\theta_{\text{ini}}$ , mm), la biomasa aérea y de raíces. Los modelos se diseñaron para cada año por lo que la fecha de inicio pudo ser enero de 2007, 2008 o 2009. La fecha de plantación fue agosto del 2004 y la duración de la rotación se estableció en 15 años. Como valores de  $\theta_{\text{ini}}$  se consideró la lámina de agua contenida en el estrato 0 m - 1.8 m del mes de enero, febrero o marzo con el fin de representar distintos escenarios de humedad remanente del año anterior. Debido a que las lluvias se presentan de junio a octubre, la humedad del suelo en el mes de marzo representaría menor disponibilidad de agua en relación con el mes de enero.

Para el sitio de estudio no fue posible realizar un muestreo destructivo para medir la biomasa aérea o de raíces y por esta razón, los valores de biomasa se obtuvieron con funciones alométricas y escalando a unidad de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ). En la literatura existen distintos modelos de regresión para determinar la biomasa (kg) en función del DAP, área basal, altura, densidad de la madera o alguna combinación de estos parámetros (Zianis y Mencuccini, 2004). Los modelos en función del DAP han explicado más de 90% de la variación en la biomasa en el género *Eucalyptus*, pero

en ocasiones se ha usado la altura y la densidad de madera para mejorar la regresión; aunque la variación explicada aumenta poco (Eamus, Burrows y McGuinness, 2000). El valor de otras variables en la relación entre la biomasa y diámetro a la altura del pecho es marginal, sobre todo cuando se considera el costo y esfuerzo para obtener datos adicionales al DAP.

La función más común para representar la biomasa es de la forma  $B = a \times (\text{DAP})^b$ , donde  $B$  es la biomasa,  $a$  y  $b$  son coeficientes de escalamiento (Zianis y Mencuccini, 2004). La transformación doble logarítmica en la relación entre la biomasa y DAP se utiliza con frecuencia para resolver problemas de homogeneidad en la varianza de la biomasa o DAP, pero para la transformación inversa y obtener estimados certeros de la biomasa, se necesita realizar ajustes en función de la varianza (Beauchamp y Olson, 1973). Senelwa y Sims (1999) concluyen que no hay diferencia entre especies de *Eucalyptus* en el modelo alométrico de biomasa basada en el DAP de plantaciones jóvenes, aunque la relación específica en la tasa de crecimiento implica una relación variable entre la biomasa y DAP conforme crece el árbol (Zianis y Mencuccini, 2004). Con estas consideraciones se usaron las relaciones propuestas por Bennett, Weston y Attiwill (1997) para los componentes de la biomasa aérea de *E. globulus* en plantaciones de edad similar a la examinada en el presente estudio. Para calcular la biomasa de las raíces mayores a 2 mm se aplicó la función; biomasa de raíces =  $5.97 \times \text{DAP}^{2.8068} \times 10^{-3}$ , usada por Forrester, Bauhus y Cowie (2006) para *E. globulus*.

### Datos climáticos

Las variables climáticas necesarias son valores mensuales para radiación neta ( $\text{Mj m}^2 \text{ d}^{-1}$ ), déficit de presión de vapor (mBar), precipitación pluvial (mm), número días con helada, temperaturas mensuales promedio ( $^{\circ}\text{C}$ ): diaria ( $T$ ), mínima y máxima. El déficit de presión de vapor y el número de días de helada, se calcularon con las rutinas de herramienta implementadas en la hoja electrónica de 3-PG. Para cada año se generó una base de datos correspondiente usando los datos

medidos de la estación meteorológica del sitio.

### Escenarios

Se modeló el desarrollo de la plantación de *E. globulus* de acuerdo con las variables  $\theta_{\min}$  y  $\theta_{\text{ini}}$ . Para cada año se utilizó una base de datos climática y la biomasa calculada con el DAP, medido al inicio del año. Los datos climáticos se asumen como constantes durante el desarrollo de la plantación. Para cada año se obtuvieron tres modelos según el valor de  $\theta_{\text{ini}}$  para representar la incertidumbre de  $\theta_{\text{ini}}$  en la modelación. Hipotéticamente el crecimiento de la plantación sería proporcional a  $\theta_{\text{ini}}$ . La magnitud de  $\theta_{\text{ini}}$  depende de la distribución y variación anual en la precipitación. La simulación del año 2007 posiblemente predeciría mejor desempeño en comparación con 2008 o 2009, si fuera insuficiente el almacenaje de agua del suelo en relación con la mayor demanda evaporativa conforme crecen los árboles jóvenes. Los tres valores de  $\theta_{\text{ini}}$  se obtuvieron con base en la lámina de agua del suelo promedio mensual de enero a marzo (Tabla 1). También se exploró el efecto de la  $\theta_{\min}$  sobre la biomasa de *E. globulus*. Se utilizaron cuatro valores de  $\theta_{\min}$  en el intervalo de 110 mm a 170 mm, correspondientes a los valores mínimos de  $\theta$  observados en 2007 a 2009.

Los modelos se evaluaron comparando los valores estimados de DAP, ET e IAF con los promedios medidos en la plantación a diferentes tiempos en función del porcentaje de error relativo ( $e\%$ , ecuación 1) y el error promedio absoluto (EPA%), donde  $O$  son los valores observados,  $Pr$  son las predicciones y  $K$  el número de observaciones (ecuación 2) (Miehle *et al.*, 2009):

$$e\% = \frac{\bar{O} - \bar{Pr}}{\bar{O}} 100 \quad [\text{ecuación 1}]$$

$$EPA\% = \frac{\sum_{k=1}^K \frac{|Pr_k - O_k|}{O_k}}{K} 100 \quad [\text{ecuación 2}]$$

**Tabla 1.** Contenido de agua del suelo en el estrato 0 m - 1.8 m, usado en el modelo 3-PG para

el contenido inicial de humedad del suelo ( $\theta_{ini}$ ).

Mes	2007	2008	2009
	mm		
Enero	240	190	229
Febrero	200	150	191
Marzo	187	137	159

El modelo 3-PG genera predicciones para una variable dada en función del tiempo (años) y de las condiciones iniciales. De esta manera la relación entre las predicciones obtenidas se representó como (ecuación 3):

$$\bar{f}(\vec{x}) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M f_k(\vec{x}) \quad [\text{ecuación 3}]$$

donde las  $M$  funciones simuladas se promedian para la  $x$  variables de interés (Zhang, Patuwo y Hu, 1998). Para cada escenario se estimaron los coeficientes de regresión entre el DAP o la biomasa total y la edad de la plantación. Se calculó el criterio de información Bayesiano ( $BIC$  ( $M_k$ )). Se asumió una distribución uniforme para la probabilidad anterior ( $P(M_k) = 1/3$ ). La probabilidad posterior ( $P(M_k | y)$ ) se calculó como (ecuación 4) (Clyde, 2003):

$$P(M_k | y) = \frac{P(M_k) e^{-0.5(BIC(M_k) - \overline{BIC}(M_k))}}{\sum_{k=1}^3 P(M_k) e^{-0.5(BIC(M_k) - \overline{BIC}(M_k))}} \quad [\text{ecuación 4}]$$

Cada coeficiente del modelo ensamblado se obtuvo como (ecuación 5):

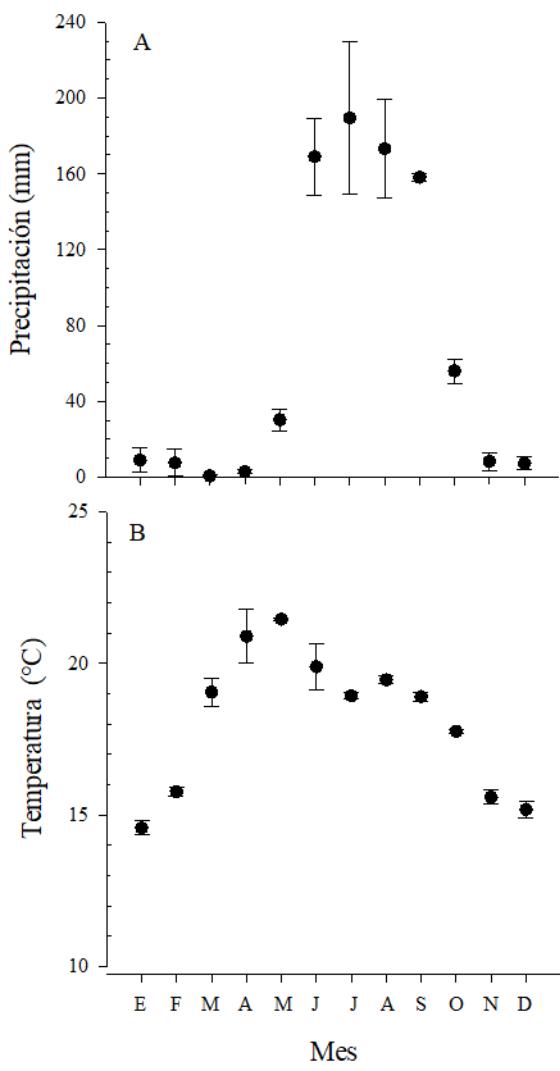
$$E(\alpha | y) = \sum_{k=1}^3 P(M_k | y) E(\beta | y, M_k) \quad [\text{ecuación 5}]$$

donde  $E(\beta | y, M_k)$  es el estimado específico para cada modelo.

## Resultados

### *Datos ambientales*

La lluvia registrada fue de 1002 mm, 729 mm y 703 mm en los años 2007 a 2009. La variación en la precipitación anual se debió a la lluvia ocurrida de mayo a octubre, correspondiente a 95% de la lluvia (Fig. 1). La lluvia de noviembre a abril resultó en  $\Delta\theta$  menor a 0.3%v/v en el estrato más superficial del suelo (0-0.1 m). La  $ET_0$  fue de 1235 mm y 1140 mm en 2007 y 2008. Para el periodo de abril del 2007 a marzo del 2018 la P fue de 959 mm, la  $ET_0$  de 1303 mm y la  $ET_c$  de 514.3 mm; siendo para este periodo entonces el  $kc$  de 0.39 y el  $IHC$  de 0.73. La temperatura promedio mensual fue similar entre los años siendo los meses más calientes los antecedentes a las lluvias (Fig. 1). La temperatura promedio anual en el periodo fue de 18.1 °C. A 1.8 m el  $\theta$  aumentó de 6.6% a 10.5%v/v del inicio al final de la temporada de lluvia, este contenido de humedad del suelo indicó ausencia de drenaje del perfil examinado.

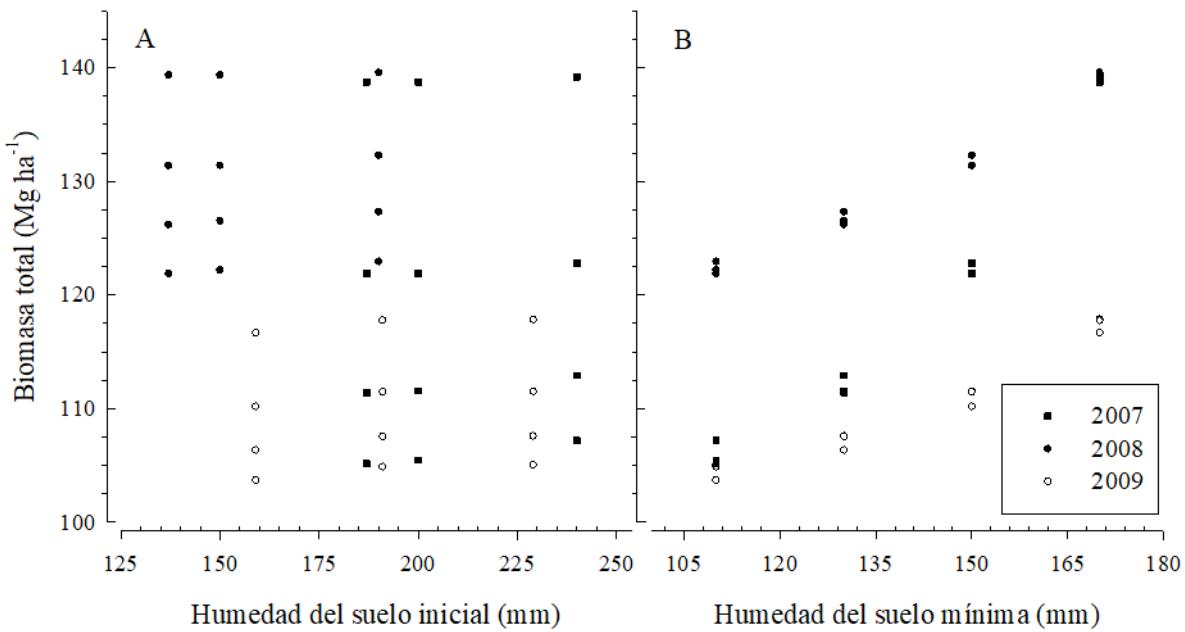


**Figura 1.** Precipitación (A) y temperatura (B) promedio mensual de 2007 a 2009. Las barras corresponden al error estándar de la media.

#### *Humedad del suelo*

La modelación de la biomasa de la plantación con 3-PG fue sensible al valor de  $\theta_{\min}$  pero no para  $\theta_{\text{ini}}$  en los intervalos explorados. En la figura 2 se muestra el resultado para la biomasa total, la tendencia en el resultado fue semejante para DAP, IMA, IAF y los componentes de la biomasa. Los resultados de la modelación usando las mediciones del 2007 sugirieron una inconsistencia entre el año de la base de datos y  $\theta_{\min}$ . Entre el año 2008 y 2009 la magnitud en diferencia entre

la biomasa total modelada se conservó, pero no fue el caso para los estimados basados en el año 2007. De los tres años, el 2007 fue el de mayor precipitación, pero 2008 y 2009 fueron años parecidos en las condiciones ambientales.



**Figura 2.** Biomasa total predicha para la plantación de *E. globulus* a cinco años (enero del 2010) usando diferentes valores de humedad del suelo inicial (A) y mínima (B).

A los cinco años el intervalo en biomasa total fue de 103.7 Mg ha<sup>-1</sup> a 139.6 Mg ha<sup>-1</sup> cuando  $\theta_{\min}$  fue 110 mm o 170 mm, respectivamente (Fig. 2). La profundidad y textura del suelo limitan la capacidad de almacenamiento, pero también la homogeneidad en la distribución de la lluvia es importante para el almacenamiento y mayor  $\theta_{\min}$ . Los suelos del sitio estudiado son planos y profundos y permiten almacenar gran cantidad de agua. Para suelos someros la importancia de  $\theta_{\min}$  puede ser menor, pero también será menor la biomasa producida. Poca agua almacenada en el suelo también es un indicador de condiciones de estrés hídrico. Por estas razones, se decidió utilizar solamente  $\theta_{\min}$  para generar los escenarios y un valor fijo para  $\theta_{\text{ini}}$ . Para cada año se utilizó

el nivel mínimo de  $\theta$  alcanzado durante el periodo: 110 mm en el horizonte 0 m -1.8 m; este valor resultó en estimados conservadores del desempeño de la plantación (Fig. 2B).

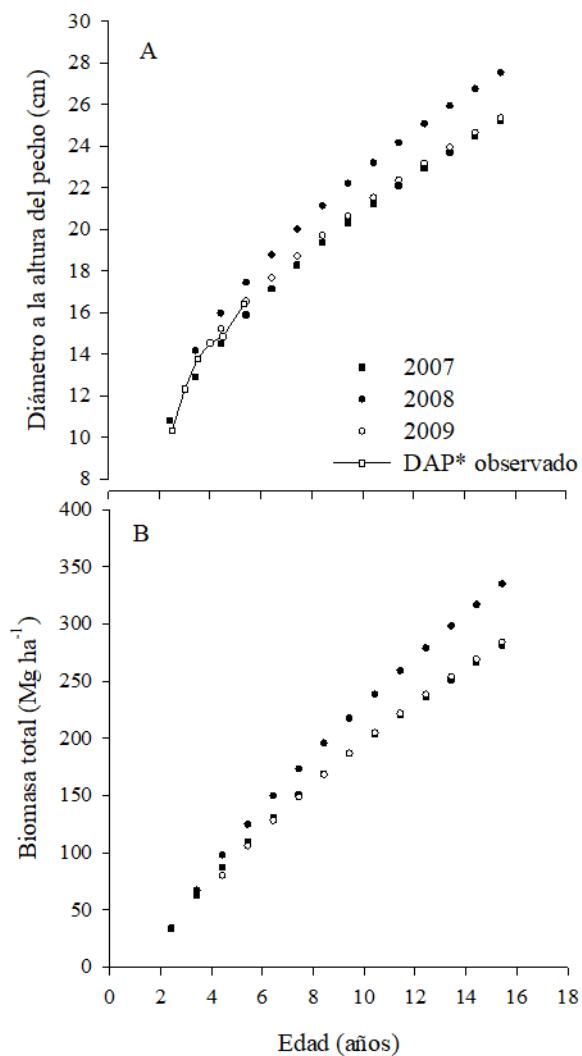
### Escenarios

El volumen fustal, IMA y DAP modelados con 3-PG fueron mayores con los datos del 2008 en relación con los otros años (Tabla 2). El mayor volumen con datos del 2008 no se debió al año anterior lluvioso pues el efecto de  $\theta_{ini}$  no fue importante (Fig. 1A).

**Tabla 2.** Volumen fustal (VF), incremento medio anual (IMA) y diámetro a la altura del pecho (DAP) de *E. globulus* predichos por el modelo 3-PG.

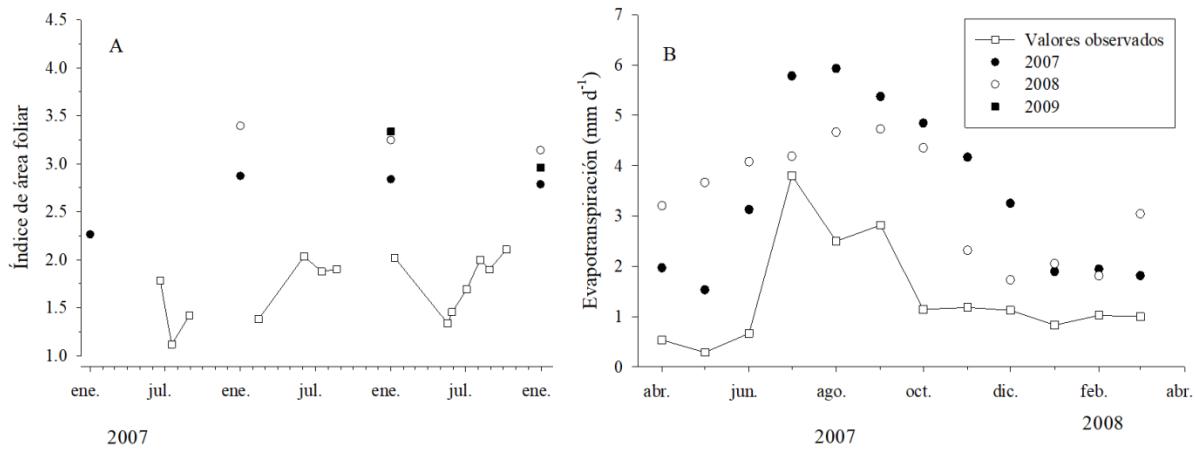
Edad (años)	2007			2008			2009		
	VF (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	IMA (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	DAP (cm)	VF (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	IMA (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	DAP (cm)	VF (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	IMA (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	DAP (cm)
4	94	21	15	119	27	16	106	24	15
8	188	22	19	233	28	21	197	23	20
12	283	23	23	350	28	25	290	23	23
15	354	23	25	439	28	28	360	23	25

En la figura 3 se presentan las series de tiempo para DAP y la biomasa total; el  $e\%$  para el DAP fue de 4.8%, 0.4% y 2.5% para el 2007 al 2009 y el EPA% fue de 5.5%, 2.8% y 2.5 %, respectivamente. El BIC para los modelos fue de 1.8, 2.4 y -0.7 para el 2007 al 2009. A juzgar por los errores para el DAP, los mejores modelos fueron los del 2008 y 2009 pero la biomasa total y DAP a los 15 años fueron similares entre los modelos del 2007 y 2009 (Fig. 3). Las representaciones del IAF y la ET por 3-PG no guardaron relación con las mediciones realizadas con el LI-2000 o con el balance hídrico de 2007-2008 (Fig. 4).



**Figura 3.** Predicciones de diámetro a la altura del pecho (A) y biomasa total (B) utilizando mediciones climáticas de los años 2007, 2008 o 2009 para la inicialización del modelo 3-PG.

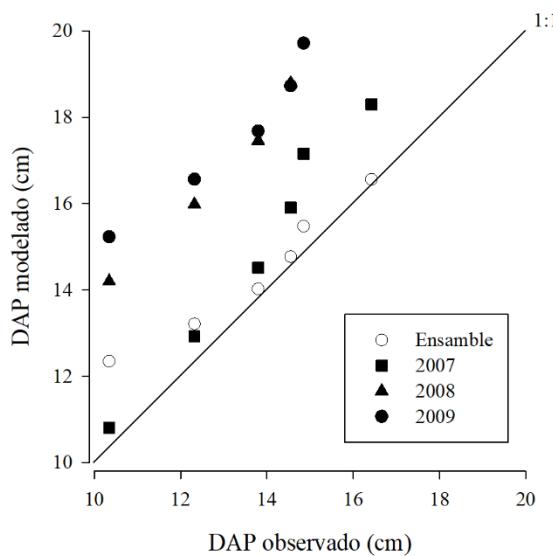
\*DAP: Diámetro a la altura del pecho.



**Figura 4.** Predicciones para índice de área foliar (A) y evapotranspiración de cultivo (B) utilizando mediciones climáticas de los años 2007, 2008 o 2009 para la inicialización del modelo 3-PG.

#### *Ensamble*

Conceptualmente, un modelo de ensamble es deseable, pues los escenarios se basan en datos ambientales obtenidos en cada año y el modelo 3-PG asume que permanecen constantes durante el turno. El modelo de cada año resultó en una sobreestimación, pero el modelo ensamblado se acercó más a la relación 1:1 (Fig. 5). La validez del presente estudio recae en la habilidad del modelo 3-PG para modelar distintas variables y por eso se comparó con las medidas del IAF y la ET; sin embargo, el resultado no fue bueno. Sobre la modelación de estas variables con 3-PG se ha enfocado a validar del modelo respecto del DAP y la biomasa con buenos resultados (Moreira de Oliveira *et al.*, 2018), para el balance de agua se ha modificado el cálculo para mejorar la estimación (Silva, Ribeiro, Neves, Barros y Leite, 2013). Con estas consideraciones se realizó un ensamble para la biomasa total, asumiendo una capacidad del modelo 3-PG para representar la biomasa semejante a la presentada para el DAP en la figura 5.



**Figura 5.** Relación entre los valores de diámetro a la altura del pecho (DAP) observados y los representados por los escenarios y el ensamble del modelo 3-PG.

La probabilidad posterior para los escenarios de biomasa total de 2007 a 2009 fue 0.19, 0.15 y 0.66, estos valores se usaron para obtener el promedio ponderado sobre todos los escenarios y teniendo más peso según el ajuste de cada escenario. El modelo ensamblado para la biomasa total fue  $y = -153.07 + 112.64 x^{0.5}$  donde  $x$  es la edad de la plantación (Fig. 3). La plantación podría cosecharse para celulosa a partir del año ocho de edad; en ese momento la predicción fue de 82.7 megagramos de carbono por hectárea, de los cuales 23.1 Mg ha<sup>-1</sup> son de raíces y 59.5 Mg ha<sup>-1</sup> de la biomasa aérea. Considerando un contenido de 58% de carbono en la materia orgánica del suelo, se estimaron 5.87 Mg ha<sup>-1</sup> de este elemento en el estrato 0 mm - 75 mm; a mayor profundidad, la contribución a la poza de carbono está dada principalmente por la biomasa de raíces. Tomado en cuenta 5.7 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa producida por *C. gayana* durante la temporada de crecimiento (Guevara-Escobar, Cervantes-Jiménez, Suzán-Azpiri, González-Sosa y Saavedra, 2012) y suponiendo 40% de carbono, la poza sería 2.28 Mg ha<sup>-1</sup> para el sotobosque. De esta forma el total de carbono en el sistema fue del orden de 90.85 Mg ha<sup>-1</sup>.

## Discusión

La modelación de la plantación con 3-PG fue sensible al valor de  $\theta_{\min}$  pero no para  $\theta_{\text{ini}}$  en los intervalos explorados. Este resultado fue acorde al análisis de sensibilidad de modelos 3-PG para *E. grandis* (Esprey, Sands y Smith, 2004). El efecto de la humedad mínima del perfil de suelo sobre la biomasa a cinco años fue importante y por eso se necesitan datos precisos de la humedad mínima. El valor de IHC fue de 0.73 y el intervalo de 0.7 a 1.0 es indicativo de una temporada seca pronunciada con  $ET_0$  excediendo a P durante varios meses; en estas circunstancias, la evapotranspiración se pude sobreestimar, si no se consideran los cambios en  $\theta$  y el acompañante aumento de la resistencia del dosel (White *et al.*, 2016). La  $\theta_{\min}$  es un parámetro que necesita instrumentación como las sondas usadas aquí (reflectometría de dominio de tiempo); sin embargo, la medición con sensores remotos y asimilación de datos puede ser una fuente de información importante (Entekhabi *et al.*, 2014).

La  $ET_c$  se mantuvo por debajo de 1 mm d<sup>-1</sup> con excepción de los meses de julio a septiembre con valores de 3.8 mm d<sup>-1</sup>, 2.5 mm d<sup>-1</sup> y 2.8 mm d<sup>-1</sup> (Fig. 4b). Los valores observados de  $ET_c$  estuvieron dentro del intervalo registrado en otros estudios (de Almeida y Riekerk, 1990; Maier *et al.*, 2017; Moreaux, O'Grady, Nguyen-The y Loustau, 2013; Silva *et al.*, 2013) y en concordancia con una distribución estacional marcada en respuesta a la precipitación pluvial y variación del área foliar (Almeida *et al.*, 2007; Moreaux *et al.*, 2013).

Posiblemente los valores altos de biomasa modelados para 2008 fueron resultado de un sesgo en la medición del DAP, pues el error estándar de la media fue mayor en este año (0.17, 0.44 y 0.15, para 2007, 2008 y 2009). No obstante, la combinación de variables ambientales pudo influir en la conversión de energía representada por 3-PG. En este sentido, Miehle *et al.* (2009) señalan que diferentes condiciones y tiempos durante la rotación del cultivo inciden en mayores errores

de 3-PG para la modelación de biomasa aérea de *E. globulus*, en comparación con otras herramientas de modelación.

Las relaciones alométricas determinadas por Bennett *et al.* (1997) para *E. globulus* se han utilizado en varios estudios para obtener estimados de la biomasa en función del diámetro a la altura del pecho (Bauhus, Van Winden y Nicotra, 2004; Forrester, Bauhus y Khanna, 2004), pero en el presente estudio posiblemente se sobreestimó la biomasa de follaje utilizada como valor inicial en 3-PG y también resultó en valores elevados del índice de área foliar. Estos aspectos necesitan revisarse obteniendo muestreos destructivos de los componentes de la biomasa. En este aspecto, la biomasa total y el diámetro a la altura del pecho son representados bien por 3-PG (Moreira de Oliveira *et al.*, 2018), pero la estimación del modelo es pobre para otras variables (ET e IAF), posiblemente debido a una combinación de factores (Almeida *et al.*, 2010).

El IAF medido fue bajo, en comparación con los valores de 3 a 6 para *E. globulus* registrados en Australia; en donde los valores disminuyen en proporción inversa al déficit hídrico y temperatura, llegando al valor óptimo cerca de los 13 °C (Battaglia *et al.*, 1998). Para el sitio de estudio, el IAF medido fue menor al modelado por 3-PG posiblemente por el efecto de mayor temperatura y los seis meses de temporada seca. Si el efecto de déficit hídrico fuera el único implicado, el IAF del sitio de estudio debió aumentar durante las lluvias después de la sequía, de manera parecida a la observada para plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil (Almeida *et al.*, 2010). Posiblemente, las ecuaciones de ajuste obtenidas en zonas templadas de Australia no son representativas de las condiciones de Jalisco, debido a una arquitectura foliar diferente, ocasionada por las condiciones subtropicales secas (Maseda y Fernández, 2016). No obstante, en el sitio la temperatura promedio anual se encontró en el límite superior del intervalo 10 °C - 18 °C para la producción óptima del dosel de eucalipto, en términos de IAF (Battaglia *et al.*, 1998).

Para explicar la discrepancia entre los valores observados y las predicciones de IAF se debe

considerar la distribución del follaje y la transferencia de la radiación en el género *Eucalyptus* como procesos reguladores de la fotosíntesis y la transpiración durante la sequía (Whitehead y Beadle, 2004). El LI-2000 tiene dificultades para evaluar la agregación de los elementos del follaje y la inclinación vertical de las hojas de *E. globulus* (Macfarlane *et al.*, 2007). Aunado a esto, la inclinación del follaje aumenta durante la sequía como mecanismo de adaptación (Whitehead y Beadle, 2004). Aunque se utilizó la corrección para el LI-2000 en rodales de eucalipto (Battaglia *et al.*, 1998), los valores de IAF medidos fueron distintos a los estimados por 3-PG. Macfarlene *et al.* (2007) encontraron una relación diferente entre el IAF determinado destrutivamente y las mediciones del LI-2000, pero al ajustar los datos del presente estudio con esa ecuación, resultó en valores aún más bajos de IAF en comparación con la ecuación de regresión de Battaglia *et al.* (1998).

Los estimados de evapotranspiración generados por el modelo 3-PG dependen directamente del IAF, pero también resultaron diferentes debido a la metodología usada en 3-PG para calcular el balance hídrico. Valente, David y Gash (1997) observaron valores de intercepción de la lluvia de 10.8% y una relación intercepción/índice de área foliar de 3.4 para una plantación de *E. globulus* en Portugal, donde la precipitación fue de 800 mm al año. El modelo 3-PG utiliza dos valores para incorporar el efecto de la intercepción de la lluvia, uno es la proporción máxima de precipitación interceptada y el segundo es el umbral de IAF para la máxima intercepción de la lluvia; los valores usados para la parametrización de *E. globulus* en 3-PG fueron 0.15 y 0.0; sin embargo, estos valores no imponen una restricción para alcanzar la máxima intercepción de lluvia en función del índice de área foliar. La representación del proceso de intercepción en 3-PG es simple y no considera los efectos de duración e intensidad de la lluvia, además de la capacidad de almacenamiento de agua del dosel (Crockford y Richardson, 2000).

El error de 3-PG en las predicciones en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus* también se

atribuye a la dificultad de simular la intercepción de la lluvia y la fotosíntesis antes del cierre del dosel (Miehle *et al.*, 2009). De manera más importante, en el modelo 3-PG no hay consideración para la vegetación asociada del sotobosque para calcular la evapotranspiración. Así, el valor de evapotranspiración obtenido con el balance hídrico del suelo representó las pérdidas de agua por la vegetación, ya fuera el eucalipto o el sotobosque de pasto; la incorporación de un módulo en 3-PG para las interacciones entre especies forestales y del sotobosque sería útil para resolver la contribución del pasto a la ET (Luedeling *et al.*, 2016). Por último, las mediciones del contenido de humedad obtenidas brindan un balance hídrico respecto de un estrato del suelo (0 m - 1.8 m) y no se puede descartar la extracción de agua a mayor profundidad. Al respecto, el contenido de agua a 1.8 m de profundidad aumentó hasta 25%v/v, valor inferior al de saturación del suelo (Guevara-Escobar *et al.*, 2012), pero el movimiento de agua en el suelo es complejo y los flujos preferenciales a mayor profundidad no pueden descartarse.

El carbono estimado para la biomasa aérea de eucalipto fue de  $59.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , este dato es comparable con lo publicado por Miehle *et al.* (2009), quienes encontraron  $45 \text{ Mg ha}^{-1}$  en la biomasa aérea para el promedio de sitios del sur de Australia con buena productividad, aunque algunos sitios alcanzaron  $79 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $125 \text{ Mg ha}^{-1}$ . En plantaciones de eucalipto en la costa atlántica de Brasil el carbono almacenado en la madera fue de  $33.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  a  $47.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  para sitios clasificados de baja productividad y en sitios con alta productividad fue de  $57 \text{ Mg ha}^{-1}$  a  $102 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Stape, Binkley y Ryan, 2004). Para el trópico húmedo de México, Seppänen (2002) establece escenarios optimistas para plantaciones de *Eucalyptus* a los siete años de edad donde el carbono almacenado en la plantación, sotobosque y suelo es de  $320 \text{ Mg ha}^{-1}$  -  $610 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

## Conclusiones

Los resultados mostraron la utilidad de las relaciones alométricas y 3-PG para modelar el

desarrollo de *E. globulus* fuera del contexto ambiental en el que se generaron. La modelación del índice de área foliar y la evapotranspiración son importantes para el conocimiento fisiológico de la población arbórea y su representación en 3-PG puede mejorarse incorporando ajustes adecuados para la estimación indirecta del índice de área foliar, balance hídrico con partición de los componentes vegetales y modelos de la intercepción de lluvia. La relevancia de la humedad mínima del suelo en el modelo 3-GP se mostró con valores observados en campo. El ensamble de escenarios mostró un mejor desempeño para la modelación del diámetro a la altura del pecho. El sitio se describió como tropical seco por el IHC de 0.73, se consideró conservador el uso de agua del eucalipto por su *kc* de 0.39 y, sin embargo, como de alta productividad por los 90.85 Mg ha<sup>-1</sup> almacenados en el sistema.

## **Reconocimientos**

Este estudio fue apoyado por el Fondo Conacyt-Conafor en el proyecto 39078. Se agradecen las facilidades otorgadas por Nicolás y Alejandro Orozco para realizar el estudio de campo, a los revisores por sus observaciones constructivas que enriquecieron al documento y a los estudiantes de la Universidad Autónoma de Querétaro involucrados en las distintas etapas de la investigación.

## **Referencias**

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO.
- 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: 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: 10.1016/j.foreco.2009.10.008
- Almeida, A. C., Soares, J. V., Landsberg, J. J., & Rezende, G. D. (2007). Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 10–21. doi: 10.1016/j.foreco.2007.06.009
- Araújo, M. B., & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in ecology & evolution*, 22(1), 42–47. doi: 10.1016/j.tree.2006.09.010
- Battaglia, M., Cherry, M., Beadle, C., Sands, P., & Hingston, A. (1998). Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: Effects of water stress and temperature. *Tree Physiology*, 18(8–9), 521–528. doi: 10.1093/treephys/18.8-9.521
- Bauhus, J., Van Winden, A. P., & Nicotra, A. B. (2004). Aboveground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(3), 686–694. doi: 10.1139/x03-243
- Beauchamp, J. J., & Olson, J. S. (1973). Corrections for bias in regression estimates after logarithmic transformation. *Ecology*, 54(6), 1403–1407. doi: 10.2307/1934208
- Beaumont, L. J., Hughes, L., & Pitman, A. (2008). Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important? *Ecology letters*, 11(11), 1135–1146. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01231.x
- Bennett, L., Weston, C., & Attiwill, P. (1997). Biomass, nutrient content and growth response to fertilisers of six-year-old *Eucalyptus globulus* plantations at three contrasting sites in

Gippsland, Victoria. *Australian Journal of Botany*, 45(1), 103–121. doi:

10.1071/bt96057

Brooker, M. I. H. (2000). A new classification of the genus *Eucalyptus* L'Her.(Myrtaceae).

*Australian Systematic Botany*, 13(1), 79–148. doi: 10.1071/SB98008

Bryars, C., Maier, C., Zhao, D., Kane, M., Borders, B., Will, R., & Teskey, R. (2013). Fixed physiological parameters in the 3-PG model produced accurate estimates of loblolly pine growth on sites in different geographic regions. *Forest ecology and management*, 289, 501–514. doi: 10.1016/j.foreco.2012.09.031

Chan, F. C., Arain, M. A., Khomik, M., Brodeur, J. J., Peichl, M., Restrepo-Coupe, N., ..., & Xu, B. (2018). Carbon, water and energy exchange dynamics of a young pine plantation forest during the initial fourteen years of growth. *Forest Ecology and Management*, 410, 12–26. doi: 10.1016/j.foreco.2017.12.024

Clyde, M. (2003). Model averaging. En S. J. Press (ed.) *Subjective and objective Bayesian statistics*. John Wiley & Sons

Crockford, R., & Richardson, D. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological processes*, 14(16-17), 2903–2920. doi: 10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2903::aid-hyp126>3.0.co;2-6

de Almeida, A. P., & Riekerk, H. (1990). Water balance of *Eucalyptus globulus* and *Quercus suber* forest stands in south Portugal. *Forest ecology and management*, 38(1–2), 55–64. doi: 10.1016/0378-1127(90)90085-P

Dvorak, W. (2012). Water use in plantations of eucalypts and pines: A discussion paper from a tree breeding perspective. *International Forestry Review*, 14(1), 110–119. doi: 10.1505/146554812799973118

- Eamus, D., Burrows, W., & McGuinness, K. (2000). *Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia*. Australian Greenhouse Office.
- Entekhabi, D., Yueh, S., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Allen, A., Bindlish, R., ..., & Crow, W. T. (2014). *SMAP Handbook–Soil Moisture Active Passive: Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space*.
- Esprey, L., Sands, P., & Smith, C. (2004). Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management*, 193(1–2), 235–250. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.032
- Food and Agriculture Organization [FAO] (1995). Plantations in tropical and subtropical regions -mixed and pure. (FAO of the United Nations, Ed.). Rome, Italy.
- Forrester, D. I., Bauhus, J., & Cowie, A. L. (2006). Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Forest Ecology and Management*, 233(2–3), 275–284. doi: 10.1016/j.foreco.2006.05.018
- Forrester, D. I., Bauhus, J., & Khanna, P. K. (2004). Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii. Synthesis of the physiological, environmental, genetic and silvicultural determinants of the growth and productivity of eucalypts in plantations.*, 193(1), 81–95. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.024
- Guevara-Escobar, A., Cervantes-Jiménez, M., Suzán-Azpiri, H., González-Sosa, E., & Saavedra, I. (2012). Producción de pasto Rhodes en una plantación de eucalipto. *Agrociencia*, 46(2), 175–188.
- Klesse, S., Babst, F., Lienert, S., Spahni, R., Joos, F., Bouriaud, O., ..., & Frank, D. C. (2018). A Combined Tree Ring and Vegetation Model Assessment of European Forest Growth

- Sensitivity to Interannual Climate Variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(8), 1226–1240. doi: 10.1029/2017GB005856
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press.
- Landsberg, J. & Waring, R. (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.
- Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., ..., & Muthuri, C. (2016). Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, 142, 51–69. doi: 10.1016/j.agsy.2015.11.005
- Macfarlane, C., Arndt, S. K., Livesley, S. J., Edgar, A. C., White, D. A., Adams, M. A., & Eamus, D. (2007). Estimation of leaf area index in eucalypt forest with vertical foliage, using cover and fullframe fisheye photography. *Forest Ecology and Management*, 242(2–3), 756–763. doi: 10.1016/j.foreco.2007.02.021
- Maier, C. A., Albaugh, T. J., Cook, R. I., Hall, K., McInnis, D., Johnsen, K. H., ..., & Vose, J. M. (2017). Comparative water use in short-rotation *Eucalyptus benthamii* and *Pinus taeda* trees in the Southern United States. *Forest ecology and management*, 397, 126–138. doi: 10.1016/j.foreco.2017.04.038
- Maseda, P. H. & Fernández, R. J. (2016). Growth potential limits drought morphological plasticity in seedlings from six *Eucalyptus* provenances. *Tree physiology*, 36(2), 243–251. doi: 10.1093/treephys/tpv137
- Miehle, P., Battaglia, M., Sands, P. J., Forrester, D. I., Feikema, P. M., Livesley, S. J., ..., & Arndt, S. K. (2009). A comparison of four process-based models and a statistical regression model to predict growth of *Eucalyptus globulus* plantations. *Ecological Modelling*, 220(5), 734–746. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.12.010

- Moreaux, V., O'Grady, A. P., Nguyen-The, N., & Loustau, D. (2013). Water use of young maritime pine and *Eucalyptus* stands in response to climatic drying in south-western France. *Plant Ecology & Diversity*, 6(1), 57–71. doi: 10.1080/17550874.2012.668228
- Moreira de Oliveira, C. M., Coll Delgado, R., Gomes de Araújo, E. J., de Almeida, A. Q., Cristian Rosa, T., & de Oliveira Júnior, J. F. (2018). Modelo 3-PG na previsão do potencial productivo de áreas para plátanos comerciais de *Eucalyptus* spp. *Ciência Florestal* (01039954), 28(1). doi: 10.5902/1980509831580
- Návar, C. J. de J., González, N., & Graciano, J. (2005). Carbon stocks and fluxes in reforested sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 11(2), 15-34. doi: 10.21829/myb.2005.1121254
- Pearson, R. G. & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12(5), 361–371. doi: 10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x
- Ruiz, R. M., Rivero, H. S. A., Alcalá, V. M. C., & Espinoza, M. G. (2006). Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 2(3), 815–846.
- Sands, P. (2004). Adaptation of 3-PG to novel species: Guidelines for data collection and parameter assignment. *CRC Sustainable Production Forestry*, Hobart, 34.
- Sands, P. & Landsberg, J. (2002). Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, 163(1–3), 273–292. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00586-2
- Senelwa, K. & Sims, R. E. (1999). Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass and Bioenergy*, 17(2), 127–140. doi: 10.1016/S0961-9534(99)00035-5

Seppänen, P. (2002). Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Forest veracruzana*, 4(2).

Silva, W. C. M. da, Ribeiro, A., Neves, J. C. L., Barros, N. F. de, & Leite, F. P. (2013). Water balance model and eucalyptus growth simulation in the rio doce basin, Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35(4), 403–412.

Smith, K. T. (2015). Compartmentalization, resource allocation, and wood quality. *Current Forestry Reports*, 1(1), 8–15. doi: 10.1007/s40725-014-0002-4

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. *Forest Ecology and Management*, 193(1–2), 17–31. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.020

Valente, F., David, J., & Gash, J. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190(1–2), 141–162. doi: 10.1016/S0022-1694(96)03066-1

Vega, R. A. & Baez, O. (2016). Ciencia y ambiente en la aclimatación del eucalipto en el Valle de México a través de la prensa, 1869-1880. *Historia y sociedad*, (30), 237–264.

Vega-Nieva, D. J., Tomé, M., Tomé, J., Fontes, L., Soares, P., Ortiz, L., ..., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2013). Developing a general method for the estimation of the fertility rating parameter of the 3-PG model: application in *Eucalyptus globulus* plantations in northwestern Spain. *Canadian journal of forest research*, 43(7), 627–636.

White, D. A., Battaglia, M., Ren, S., & Mendham, D. S. (2016). *Water use and water productivity of eucalyptus plantations in South-East Asia*. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR).

- Whitehead, D. & Beadle, C. L. (2004). Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management*, 193(1–2), 113–140. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.026
- Wilkinson, G. R., Schofield, M., & Kanowski, P. (2014). Regulating forestry—Experience with compliance and enforcement over the 25 years of Tasmania's forest practices system. *Forest Policy and Economics*, 40, 1–11. doi: 10.1016/j.forpol.2013.11.010
- Zhang, G., Patuwo, B. E., & Hu, M. Y. (1998). Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International journal of forecasting*, 14(1), 35–62. doi: 10.1016/S0169-2070(97)00044-7
- Zianis, D. & Mencuccini, M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187(2–3), 311–332. doi: 10.1016/j.foreco.2003.07.007

Manuscrito recibido el 5 de octubre de 2018

Aceptado el 25 de julio de 2019

Publicado el 30 de marzo de 2020

Este documento se debe citar como:

Guevara-Escobar, A., Cervantes-Jiménez, M., & Suzán-Azpiri, H. (2020). Uso del modelo 3-PG para la predicción de biomasa de eucalipto en Jalisco, México. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611876. doi: 10.21829/myb.2020.2611876