

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE PLANTACIONES DE TECA (*TECTONA GRANDIS* L.), MEDIANTE EL ENFOQUE DE ESPACIO DE ESTADOS

Mauricio Jerez Rico^{*}, Ph.D., María Alejandra Quintero, M.Sc.; Ana Mercedes Quevedo Rojas M.Sc. y Ana Yajaira Moret Barillas, M.Sc.

*jerez@ula.ve, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 5101 tel. 584147486824 fax 582742401519);

Resumen

La planificación eficiente y ejecución del manejo de plantaciones forestales para producir bienes y servicios a cualquier escala, requiere estimar y proyectar el crecimiento con la mayor precisión posible, lo cual es complejo, dada la gran cantidad de variables involucradas (ambientales, económicas y sociales) dando origen a un sinnúmero de escenarios de manejo. El modelado y la simulación son herramientas apropiadas para afrontar este tipo de problemas dado que permiten integrar el conocimiento que se va generando como resultado de investigación teórica, experimental y el monitoreo, y por otra parte, dado que el manejo de plantaciones difícilmente puede esperar a obtener resultados de ensayos de campo, tiene la ventaja de permitir demostrar las consecuencias en el corto a largo plazo de los posibles escenarios a través de una realidad virtual. El objetivo del trabajo fue desarrollar un simulador de crecimiento y rendimiento para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.), una especie forestal de gran valor. El modelo está basado en el enfoque de "espacio de estados" en el cual el sistema es descrito mediante ecuaciones diferenciales que representan las tasas de cambio de unas pocas variables de estado de la masa forestal (área basal, densidad y altura dominante). Otras variables como la biomasa, volumen total y comercial y distribuciones diamétricas se derivan a partir de las variables de estado. Los datos para la construcción del modelo provienen de numerosas parcelas de crecimiento y rendimiento representativas de diversos regímenes de manejo empleados en los Llanos de Venezuela. El modelo fue programado en el lenguaje visual-declarativo de Simulación SIMILE® V. 5.8 desarrollado para modelar sistemas ecológicos y agroforestales. En este trabajo se describe la construcción del subsistema de crecimiento del modelo y se ilustra su comportamiento para escenarios sin aclareos.

Introducción

Los modelos de crecimiento son vitales para la planificación del manejo forestal. Proyectar el crecimiento y rendimiento de rodales individuales es un prerrequisito para planear el manejo de los bosques a cualquier nivel. Por lo tanto los gestores necesitan tener cierto conocimiento de las varias técnicas de modelado del crecimiento y de sus limitaciones. Uno de los tipos de modelos de crecimiento y rendimiento (growth and yield models) lo constituyen los *modelos de rodal*, en los cuales las unidades básicas de modelado son variables a nivel de rodal.

El enfoque de espacio de estados propuesto por García (1984, 1994) se basa en un sistema de ecuaciones diferenciales. Se utilizan variables de estado (ej. altura mayor, área basal y densidad) para representar al sistema en una etapa inicial, y

funciones de transición para proyectar las variables de estado en el futuro (Vanclay, 1994). Se asume que las variables de estado resumen los eventos que afectarán el desarrollo futuro del rodal y por lo tanto, los estados futuros pueden ser determinados por el estado presente y las acciones futuras, mientras que otras variables de interés (ej. volumen) pueden derivarse a partir de las variables de estado. Para cumplir con este supuesto, las variables de estado deben describir adecuadamente la composición y estructura del rodal, y deberían reflejar todos los tratamientos silviculturales aplicados en el pasado, a fin de que las predicciones de crecimiento no necesiten información sobre la edad del rodal, edades en que se hicieron los aclareos, etc. En el enfoque de espacio de estados, se evita modelar directamente las complejas relaciones entre entradas y salidas a través del tiempo. En lugar de ello, se describe el estado del sistema en cada instante, y se modela la tasa de cambio de estado.

En el presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar el módulo de crecimiento para un modelo de simulación del crecimiento y rendimiento para plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.), el módulo se programó usando el software Simile® v5.8 un lenguaje visual-declarativo para desarrollar simuladores de sistemas ecológicos y agroforestales. A manera de ilustración se utiliza el simulador para proyectar el crecimiento y rendimiento de un rodal no raleado para un periodo de 50 años.

Materiales y métodos

Datos

Los datos provienen de mediciones de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento establecidas en plantaciones de tecla en la Estación Experimental Caparo entre los años 1970 y 2000. Las mediciones se realizaron a intervalos de uno o dos años. Los espaciamientos iniciales variaron desde 2,0×2,0 hasta 4,0×4,0 m, así como los regímenes de aclareo (0 a 4). La densidad al momento de las mediciones varió entre 300 y 2400 árboles ha⁻¹. La altura mayor (m) fue medida con hipsómetro de Haga. (Cuadro 1).

Estructura del modelo

El enfoque de espacio de estados es adecuado para sistemas que evolucionan en el tiempo, tales como los sistemas forestales (Diéguez-Aranda et al., 2006). El modelo considera como variables de estado el espaciamiento promedio del rodal (S en metros), su altura mayor (H en metros), la biomasa del fuste (W en m³ ha⁻¹) y un factor de intercepción de luz ó cierre relativo del dosel (Ω). En términos generales, el crecimiento en altura y su relación con la calidad de sitio viene dado por un sub-modelo de crecimiento en altura mayor. Para un sitio dado, la tasa de mortalidad se representa como un incremento en el espaciamiento promedio que depende del número de árboles y la altura dominante. La tasa de crecimiento de la biomasa del fuste por hectárea equivale al incremento bruto de esta menos la mortalidad observada. Los cambios en espaciamiento promedio son afectados por un factor de ocupación, el cual está relacionado de manera no lineal a un “cierre relativo del dosel” que representa la cantidad de foliage y raíces finas. La tasa de incremento en rodales abiertos es predicha como una función del cierre actual del dosel y la altura dominante. Este enfoque ha dado origen a diversos modelos de crecimiento y rendimiento cuya principal característica es la simplicidad en su

estructura e información requerida, así como su robustez (García y Ruíz, 2003, García, 2011). En términos generales el modelo se puede representar a través del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{dH}{dt} &= f_1(H) \\ \frac{dS}{dt} &= f_2(H, S) \\ \frac{dW}{dH} &= f_3(W, H; \Omega,)\end{aligned}$$

A continuación se describen las funciones de transición y las ecuaciones correspondientes a las variables de salida.

Altura dominante e índice de sitio

El crecimiento en altura mayor se modeló mediante una ecuación de Chapman-Richards en su forma derivada (Clutter, 1983):

$$\frac{dH}{dt} = \frac{b}{c} \cdot H \cdot \left(\left(\frac{a}{H} \right)^{c-1} \right)$$

donde H = altura dominante y t= edad en años y a, b y c son coeficientes estimados mediante el método de ecuaciones diferenciales estocásticas usando el paquete EasySDE (García, 2003) . El índice de sitio se representó mediante una familia de curvas anamórficas donde a es considerado el parámetro local (Figura 1)

Espaciamiento promedio

El cambio en el número de árboles por hectárea en el tiempo, y por ende la tasa de mortalidad, se representó indirectamente usando como variable de estado el espaciamiento promedio (S –m-) mediante la siguiente ecuación diferencial,

$$\frac{dS}{dt} = \gamma \cdot \beta^{\frac{\gamma}{\alpha}} \cdot H^{(\gamma-1)} \cdot S^{(1-\alpha)} \cdot \frac{dH}{dt}$$

donde: α, β, γ son parámetros a estimar, S = espaciamiento promedio(m), H= altura dominante(m). La mortalidad es función de la altura dominante y del espaciamiento en un momento dado. En la Figura 2 se muestra las curvas de densidad ajustadas en función de la altura mayor.

Biomasa

Se representó con la siguiente ecuación diferencial

$$\frac{dW}{dH} = a_w \cdot \Omega \cdot H^{b_w} \left(\frac{10000}{S^2} \right)^{c_w} \cdot \frac{dH}{dt}$$

donde a_w , b_w , c_w son coeficientes estimados por regresión no lineal. W es la biomasa del fuste (m^3) con $W = B \cdot H_p$ siendo $B = \text{área basal } (m^2 \text{ ha}^{-1})$ y $H_p = \text{altura promedio del árbol } (m)$, $H = \text{Altura dominante } (m)$, $\Omega = \text{factor de intercepción de luz}$ y $S = \text{espaciamiento promedio en m}$. Los datos de $B \cdot H$ se ajustaron en función de la edad mediante regresión no lineal.

Factor de intercepción de luz

Por simplicidad se representó la tasa de cambio del factor de intercepción de luz que representa a la cantidad de foliaje y raíces finas como la siguiente función lineal

$$\frac{d\Omega}{dt} = k * (1 - \Omega)$$

Variables de salida

A partir del sistema de ecuaciones diferenciales se pueden generar toda una serie de variables de salida para representar adecuadamente el rendimiento de la plantación en cualquier momento dado a través de variables como del diámetro cuadrático, el área basal, la altura promedio y el volumen total del rodal en p . Se puede obtener información mas detallada como productos aprovechables para diferentes objetivos mediante la incorporación de funciones de distribución diamétrica y ahusamiento. Igualmente, diferentes índices de competencia pueden ser obtenidos de manera directa, a partir de los cuales se pueden proponer regímenes de raleos y podas.

Estructura del modelo

La estructura del subsistema de crecimiento se resume en las siguientes funciones de transición:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{b}{c} \cdot H \cdot \left(\left(\frac{a}{H} \right)^{c-1} \right)$$

$$\frac{dS}{dt} = \gamma \cdot \beta \frac{\gamma}{\alpha} \cdot H^{(\gamma-1)} \cdot S^{(1-\alpha)} \cdot \frac{dH}{dt}$$

$$\frac{dW}{dH} = a_w \cdot \Omega \cdot H^{b_w} \left(\frac{10000}{S^2} \right)^{c_w} \cdot \frac{dH}{dt}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = k * 1 - \Omega$$

y las siguientes variables de salida (que representan un subsistema de rendimiento simplificado):

Densidad (arb ha^{-1}): $N = 10000/S^2$

Área basal ($m^2 \text{ ha}^{-1}$): $AB = \frac{W}{H}$

Diámetro del árbol medio (diámetro cuadrático) : $dam = 100 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot AB}{\pi \cdot N}}$




Altura promedio del rodal : $H_p = 0.8 \cdot H$

Volumen con y sin corteza (m^3ha^{-1}) (Moret et al. 1998)

$$V_{cc} = 0.343378 \cdot ((dam)^2 \cdot H_p)^{0.933831}$$

$$V_{sc} = 0.2600579 \cdot ((dam)^2 \cdot H_p)^{0.96363802}$$

Resultados y discusión

Los coeficientes ajustados para las diferentes funciones de transición se presentan en la Tabla 2. El diagrama del modelo, programado en el lenguaje Simile se muestra en la Figura 4. Las cajas representan las variables de estado, las flechas  representan las tasas de cambio,  representan los coeficientes y variables de salida y las flechas  representan las relaciones entre los diferentes componentes del modelo. Nótese que el diagrama no solo representa la estructura del modelo, sino que es el simulador en sí. Por ejemplo, las tasas de cambio contienen las ecuaciones de transición y las flechas de relación asocian variables y coeficientes con las ecuaciones correspondientes. Este tipo de lenguaje se basa en los tradicionales diagramas de Forrester y son usados en otros lenguajes similares como Vensim y Stella, sin embargo, Simile tiene una serie de estructuras de programación que facilitan enormemente la programación de modelos ecológicos y forestales complejos.

A modo de ilustración se presenta la simulación de un escenario de Crecimiento y rendimiento sin aclareos, asumiendo un espaciamiento inicial de 2.0 x 2.0 m y un índice de sitio de 25 m (edad base = 16 años). El modelo se corrió para 50 años, usando el método de integración de diferencias finitas con intervalos de 0.1. Los resultados para las principales variables de salida se presentan en la Figura 5

El comportamiento del modelo presenta resultados razonables para las condiciones del escenario (un rodal sin aclareos). El área basal, se estabiliza hacia los 40 m^2ha^{-1} al igual que el diámetro del árbol medio (cm) es cual se mantiene por debajo de 20 cm (Figura 5a). La altura mayor y altura promedio aumentan rápidamente hasta los 20 años y después se estabilizan (Figura 5b). La densidad del rodal decae fuertemente en los primeros años por efecto de la competencia cayendo desde 2500 árboles ha^{-1} hasta cerca de 1500 arb ha^{-1} (Figura 5c). En la misma figura se observa la trayectoria del índice de densidad del rodal, el cual alcanza un máximo de 980 arb ha^{-1} , muy cercano al valor estimado para la teca en diferentes países (de 1050 a 1100 arboles ha^{-1}). El volumen total por hectárea con corteza y sin corteza está asimismo dentro de límites esperados (Figura 5d), al igual que el IMA del volumen con un máximo de 18 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ (Figura 5e). El cierre del dosel ocurre muy rápidamente en la plantación y permanece cerrado a lo largo del turno (Figura 5f). Estos resultados describen bien las condiciones observadas en parcelas permanentes de crecimiento con características similares en los Llanos de Venezuela. Escenarios distintos también han producido resultados aceptables. Sin embargo, la robustez del modelo deberá probarse usando datos de otras regiones y países. Actualmente, se están desarrollando subsistemas de manejo (aclareos y podas – Figura 6), rendimiento (distribuciones diamétricas, ahusamiento). Las características del modelo, permiten también la integración con procesos

ecológicos y fisiológicos que regulan el desarrollo del rodal bajo diferentes condiciones, lo que permitirá desarrollar modelos más realistas, aunque manteniendo una relativa simplicidad. Los lenguajes de programación visual, particularmente el Simile, poseen características que facilitan mucho el desarrollo de simuladores al simplificar la representación de fenómenos complejos (ej. Competencia), así como herramientas para realizar la validación de los modelos (análisis de sensibilidad, etc.) y herramientas gráficas. La integración con otras herramientas (Bases de datos y Sistemas de Información geográficos) se puede realizar también con relativa facilidad.

Conclusiones

El modelo de simulación desarrollado en este trabajo muestra el potencial que tienen este tipo de modelos y su utilidad en el manejo de plantaciones forestales. Mediante el uso de una herramienta cuantitativa como son los modelos de simulación de espacio de estados es posible disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones en el sector forestal, y específicamente en el manejo de plantaciones forestales.

Referencias bibliográficas

- Diéguez-Aranda U. , F. Castedo , J.C. Álvarez y A Rojo (2006) Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (north-western Spain). *Ecological Modelling* 191 (2): 225 – 242.
- García, O. (2011) A parsimonious stand model for interior spruce in British Columbia. *Forest Science* 57(4), 265-280.
- García, O (2003) Site Index SDE Software Advanced and Programmers Manual. www.unbc.ca/assets/forestry/forestgrowth/sde/guide.pdf. Consultado 15 Agosto 2011
- García O. y F. Ruiz (2003) A growth model for eucalypt in Galicia, Spain. *Forest Ecology and Management* 173 (1-3): 49-62.
- García, O. (1994) The state-space approach in growth modelling. *Canadian Journal of Forest Research*. 24 (9): 1894-1903.
- García, O, (1984) New class of growth models for even-aged stands: *Pinus radiata* in Golden Downs forest. *New Zealand Journal of Forestry Science*.14: 65-68.
- Moret, A.; M. Jerez, M.; y A. Mora (1998) Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal caparo, estado Barinas, Venezuela, *Revista Forestal Venezolana*, 42(1): 41-50.
- Vanclay J.K. (2006). Spatially-explicit competition indices and the analysis of mixed species plantings with the Simile modelling environment. *Forest Ecology and Management*, 366: 295-302
- Vanclay J.K. (1994) Modeling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International. UK.

Agradecimientos

El presente trabajo es resultado parcial del proyecto Modelo de Simulación del Crecimiento para Plantaciones de Teca en Venezuela CDCHT-ULA FO-686-08-01-B, realizado en el marco del Taller de Investigación “Elementos para la construcción de Modelos de Crecimiento y Rendimiento de Plantaciones Forestales” impartido entre el 28-10 y el 08-11-2010 en Mérida, Venezuela por el Dr. Oscar García, de la universidad of Northern British Columbia (Cánada)

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Estadísticas básicas del conjunto de datos utilizado para el desarrollo del modelo

Cuadro 2. Coeficientes ajustados para el modelo. (Todos los coeficientes con $p < 0001$).

Lista de Figuras

Figura 1. Ajuste de las curvas de altura dominante(m).

Figura 2. Densidad (i.e. espaciamiento promedio en m) ajustadas en función de la altura mayor.

Figura 3. Datos de Biomasa del fuste ($W = B \cdot H - m^3$ -) en función de la edad.

Figura 4. Diagrama del modelo de espacio de estados para teca programado en SIMILE® v.5.8.

Figura 5. Salidas gráficas representando las trayectorias para un periodo de 50 años de las principales variables de salida (ver leyendas respectivas) obtenidas a partir del simulador

Figura 6. Área Basal (izquierda) y Volumen (derecha) en el modelo de rodal para teca (*Tectona grandis* L.), con dos (2) aclareos del 40% de N en los años 15 y 30. *Tiempo de simulación 60 años.*

Figura 7. Representación visual de la simulación del crecimiento de rodales de plantaciones mixtas usando el lenguaje Simile (tomado de Vanclay, 2006).

Cuadro 1.

Variable de rodal	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Edad	13.63	1.80	29.90	7.40
Diámetro promedio	21.10	5.80	35.20	5.29
Densidad	1148.03	317	2125	418.86
Altura promedio	20.52	6.80	30.80	4.71
Altura mayor	22.06	7.90	33.2	4.86
Area basal	25.58	3.79	51.69	9.41

Cuadro 2

dH/dt	dS/dt	dW/dH	dΩ/dt
a=26.93	$\alpha=3.16507$	$a_w = 0.0004048$	k=0.5
b=0.1453	$\beta=0.06542$	$b_w = 3.896$	
c= 0.9320	$\gamma=4.50113$	$c_w = 0.0566$	

Figura 1

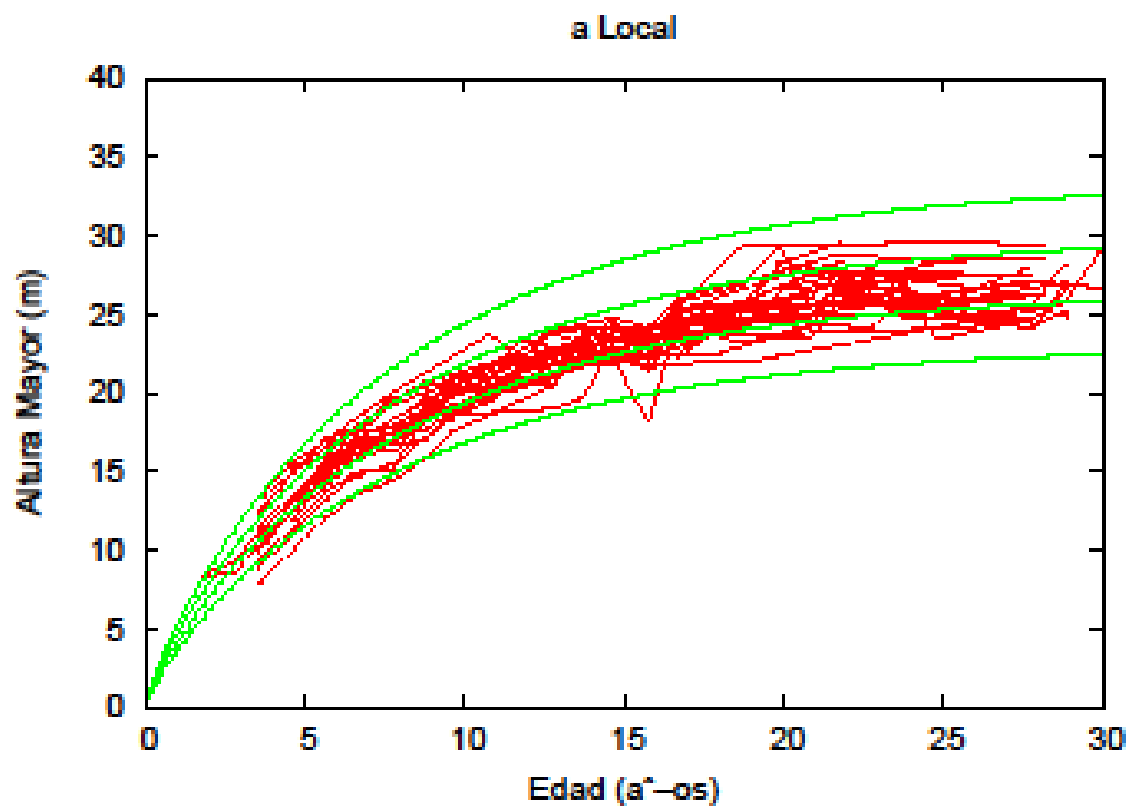


Figura 2

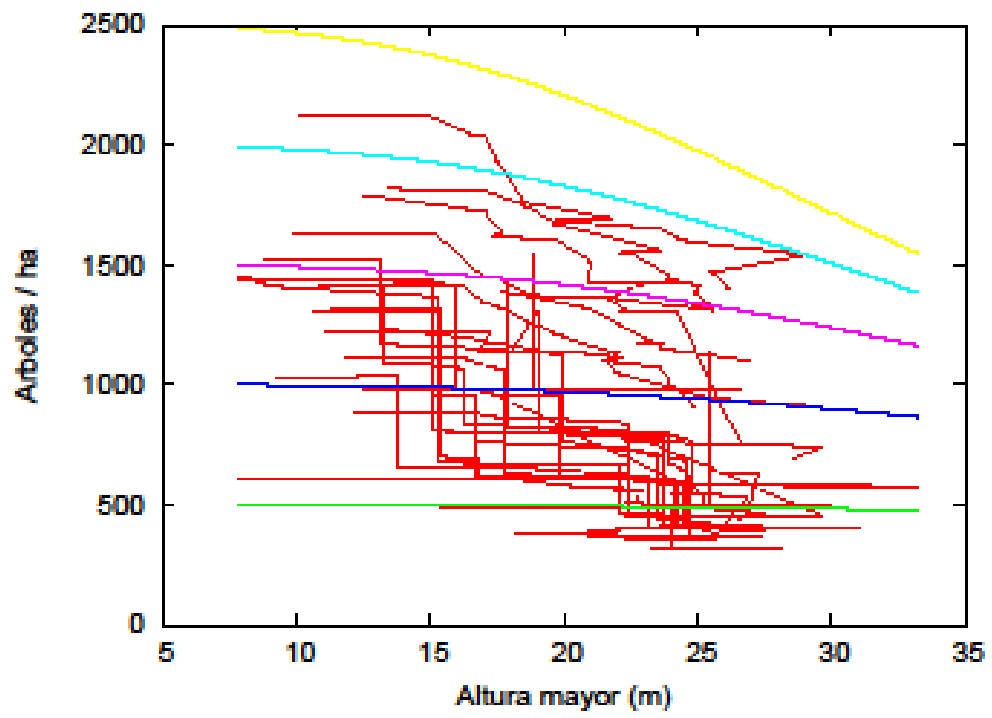


Figura 3

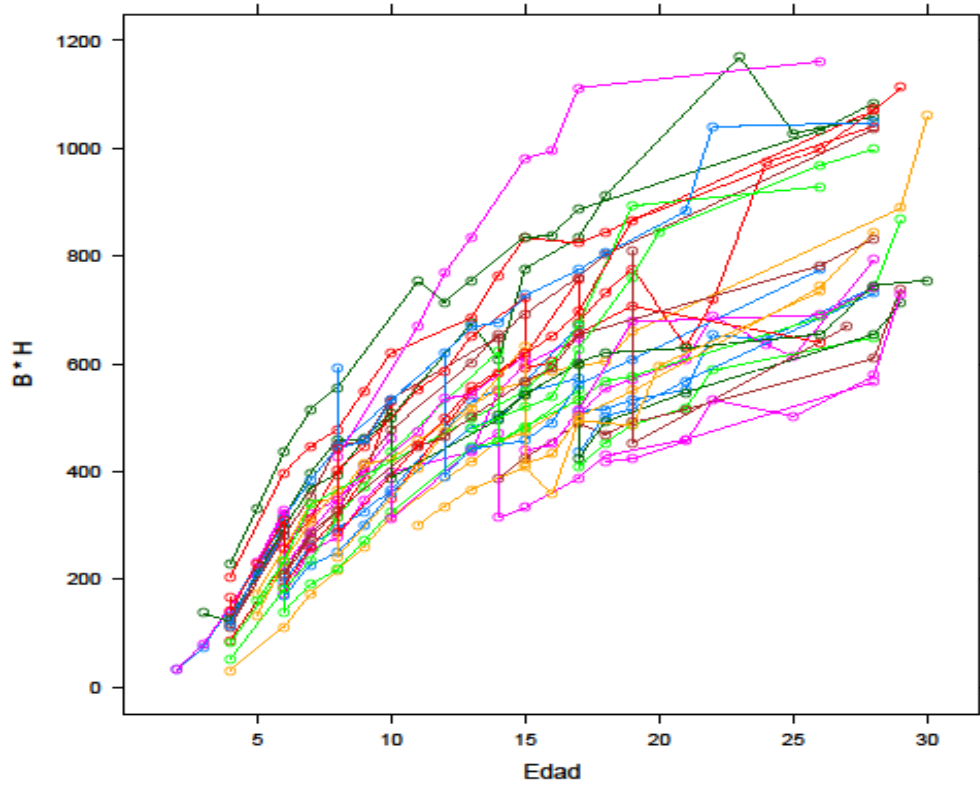


Figura 4.

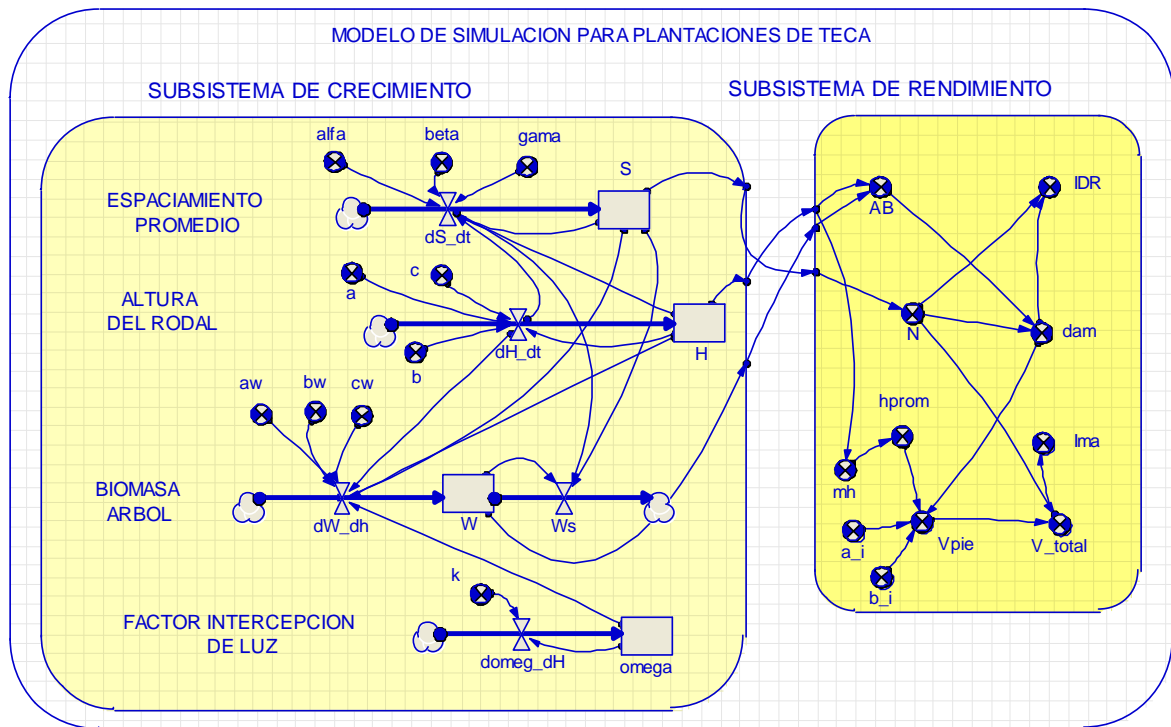


Figura 5

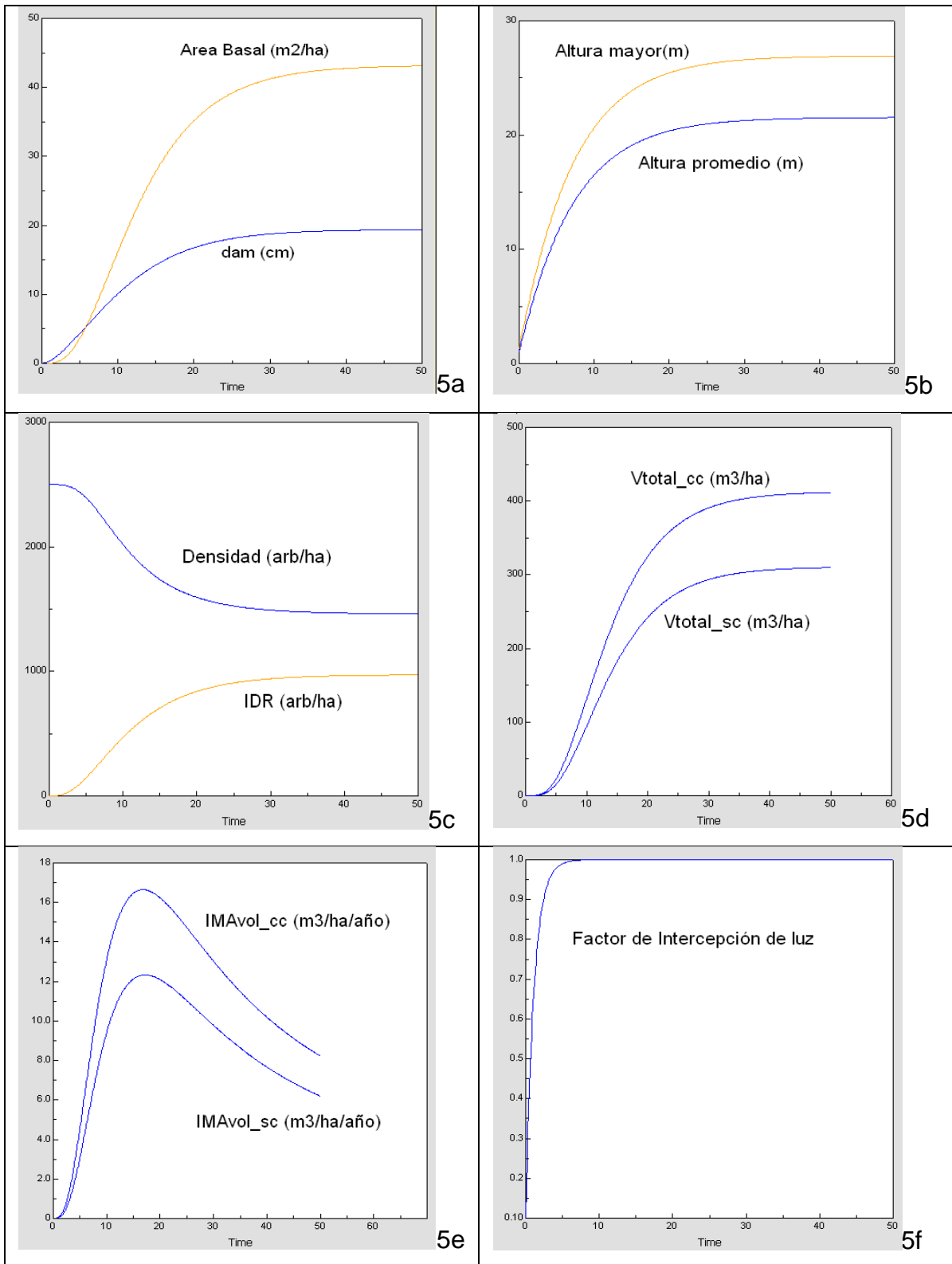


Figura 6.

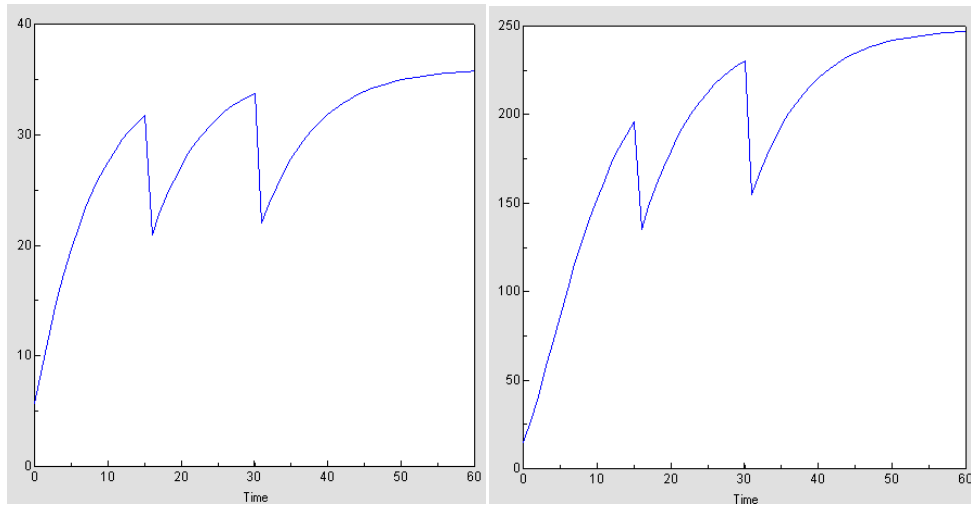


Figura 7

