

Simulador de base individual espacialmente explícito para Plantaciones forestales

Spatially explicit individual-based simulator for forest plantations

Jerez, Mauricio^{1*}; Rubio, Michail²; Quevedo Ana³; Jerez, Carlos⁴; Quintero, María⁵; Vincent, Lawrence⁶

¹Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela.

²Escuela de Ingeniería de Sistemas. Facultad de Ingeniería, ULA

³Escuela Técnica Superior Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA

⁴Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, ULA

⁵Escuela de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA

⁶Forest Biopower. New México, EE.UU.

*jerezorama@gmail.com.ve

Resumen

*Presentamos un prototipo de simulador de crecimiento de plantaciones forestales desarrollado bajo el enfoque de modelado de base individual. El modelo representa el crecimiento diamétrico del fuste y de la copa de los árboles en una plantación de teca (*Tectonagrandis*L.f) sin intervenciones silviculturales. El crecimiento está regulado por el grado de competencia entre los árboles, el cual es una relación empírica que refleja las restricciones en la disponibilidad de recursos (luz, agua, nutrientes) para un conjunto de árboles con respecto a los requerimientos necesarios para su crecimiento óptimo. El modelo de simulación se implementó a través del lenguaje declarativo-visual SIMILE. El modelo utiliza un archivo de datos con información inicial sobre el tamaño de los árboles (diámetro a la altura de pecho) y sus coordenadas espaciales. La intensidad de la competencia a que está sometido cada árbol depende de su tamaño relativo y distancia en relación a sus competidores. Los árboles competidores son aquellos cuyo radio de copa se intercepta con el radio de copa del árbol “sujeto”. Una función de mortalidad dependiente del tamaño de los árboles determina la probabilidad de muerte de los árboles. Una corrida del modelo evidenció un comportamiento razonable en el crecimiento individual de los árboles y del rodal cuando se comparó con el crecimiento observado en condiciones reales.*

Palabras clave: índice de competencia, lenguaje declarativo-visual, SIMILE, teca, *Tectonagrandis*

Abstract

*We present a planted forest growth simulator prototype based on the individual-tree model approach. The model represents the stem diameter and crown growth for trees in a teak plantation (*Tectonagrandis* L.f.) with no silvicultural interventions. Tree growth is regulated by the degree of competition among trees defined as an empirical relationship reflecting the constraints in resource availability (light, water, nutrients) for an assemblage of trees with respect to their requirements for optimum growth. The model was implemented in the SIMILE visual-declarative language. The model uses a data file with initial information on tree size (diameter at breast height) and their spatial coordinates. The competition intensity to which each tree is subjected depends on its relative size and distance in relation to competitor trees. Competitor trees are those whose crown radii intercepts with the crown radius of the “subject” tree. A mortality function depending on tree size determines the probability of trees dying. Model runs evidenced a reasonable behavior in the growth of individual trees and the stand when compared with growth observed under actual conditions.*

Key words: Competition index, visual-declarative modelling language SIMILE, teak, *Tectonagrandis*.

1 Introducción

Con el empleo de modelos de simulación del crecimiento y rendimiento de masas forestales, los manejadores de bosques pueden obtener información que ayude a tomar decisiones con miras a optimizar la producción de bienes y servicios, así como estudiar su dinámica como sistemas ecológicos y ambientales. Según el nivel de resolución los modelos de crecimiento y rendimiento se clasifican en modelos de rodal, modelos de clase de tamaño y modelos de base individual. Los modelos de rodal utilizan parámetros que describen al rodal, entendiéndose éste como una porción de un bosque homogéneo de acuerdo a ciertos criterios predefinidos como edad, calidad de sitio, composición de especies, etc. Un rodal o una parcela son las superficies mínimas de bosque a simular. Los parámetros más comunes a simular en los modelos de rodal son la densidad (número de árboles por unidad de superficie), diámetro promedio a la altura de pecho (medido a 1,30 m de altura), área basal (suma del área de la sección transversal de cada árbol a la altura del pecho), altura total promedio del rodal y volumen (ej. la cantidad de madera aprovechable para cierto uso).

Los modelos de clases de tamaño dividen el rodal en dos o más clases, pero con menos clases que el número total de árboles medidos en el rodal. Esto crea un modelo relativamente simple que puede representar estructuras más complejas del rodal en comparación con los modelos de rodal (Weiskittel y col., 2011). Los modelos matriciales y modelos de cohortes son ejemplos típicos de este enfoque.

Por otro lado, los modelos de base individual describen el crecimiento de árboles representativos del rodal y la suma de sus atributos, generando valores que describen las propiedades a nivel del rodal. Estos modelos ofrecen varias ventajas cuando se comparan con otros enfoques, ya que, son más flexibles para caracterizar de manera precisa el crecimiento bajo una serie de condiciones de sitio, y suministran salidas detalladas y de alta resolución que pueden ser utilizadas para evaluar aspectos tales como, localización de la madera, hábitat silvestre, etc. (Jerez 1992). Según Weiskittel y col. (2011) los modelos de base individual se han convertido en el nuevo standard para modelar el crecimiento y rendimiento en muchas partes del mundo.

En los modelos de base individual, el crecimiento de cada árbol en particular (árbol sujeto) es afectado por el crecimiento de los árboles vecinos (competidores o facilitadores) a través de sus interacciones. La competencia es una de las posibles formas de interacción entre plantas, estando entre las más antiguas nociones en Biología y Ecología (Pommeraning y col., 2018). La competencia entre los árboles surge cuando la disponibilidad de recursos es menor que la suma total de los requerimientos que éstos tienen para su crecimiento óptimo (Brand y col., 1988). Se han realizado numerosos estudios para tratar de cuantificar el efecto de la competencia sobre el crecimiento de los árboles, entre los que destacan los llamados “Índices de Competencia”, que

son fórmulas matemáticas que relacionan diversas características de un árbol y de sus competidores (por ejemplo, diámetro del fuste y/o de la copa, distancia entre los individuos, etc.) para tratar de predecir el crecimiento (Jerez y col., 1999). Se han desarrollado muchos tipos de índice de competencia, pero no se ha encontrado uno que sea universalmente superior a los demás (Burkhardt y col., 2012). Su desempeño depende del tipo y características del bosque. Por tanto, existen muchas posibilidades para perfeccionar los métodos ya existentes. El desarrollo de estos modelos puede contribuir a una mejor comprensión de los procesos de competencia entre plantas, incluyendo la disminución de recursos disponibles (competencia simétrica) y la anticipación en la adquisición de los recursos (competencia asimétrica) (Pommeraning y col., 2018).

En el campo de la simulación, en las últimas dos décadas ha tomado impulso el enfoque denominado modelado declarativo, basado en el principio de la representación del modelo en la computadora como una especificación de su estructura conceptual y matemática, en lugar de instrucciones que indican al computador la ejecución de una serie de cálculos. La especificación define los objetos y variables en el modelo, así como las relaciones entre ellos (Jerez y col., 2015). Esto permite tratar el modelado como un proceso de diseño en el cual los modeladores deciden qué componentes y variables incluir en sus modelos y como deben conectarse.

El lenguaje declarativo-visual SIMILE fue diseñado originalmente para modelar y simular sistemas agroforestales, pero es muy útil también para modelar sistemas ecológicos y forestales (Vancla y col., 2003). SIMILE posee una interfaz gráfica muy intuitiva que permite construir fácilmente modelos complejos sin grandes habilidades de programación (Vancla y col., 2003). Los ambientes de modelado visual, basados en el paradigma de dinámica de sistemas, han facilitado enormemente el acceso al campo de la simulación a estudiantes e investigadores con pocas habilidades matemáticas y de programación (Muetzelfeldt y col., 2003).

El objetivo de este trabajo fue desarrollar el prototipo de un simulador genérico de base individual espacialmente explícito utilizando el software SIMILE que permita representar la dinámica del crecimiento de árboles sometidos a diversos grados de competencia en plantaciones puras y mixtas. En el presente artículo, se presenta el caso de la dinámica de crecimiento de los diámetros de fuste y copa de una plantación pura de teca (*Tectonagrandis* LF) con datos de crecimiento desde los 3,4 a los 38,8 años de edad en ausencia de intervenciones silviculturales (e.j. aclareos o podas).

2 Marco teórico

Los modelos de crecimiento y rendimiento son herramientas de amplio uso en el manejo de bosques ya que permiten la proyección y evaluación del desarrollo futuro

del rodal, la influencia de regímenes alternativos de manejo y el impacto potencial del cambio climático (Weiskittel 2014). Los modelos de crecimiento y rendimiento tienen una larga historia de desarrollo y utilización, sobre todo en las últimas dos décadas debido a la disponibilidad de poderosos computadores personales que permiten realizar complejos análisis de datos y simulaciones.

Según Forrester y Whelan (1994), el modelado es un elemento fundamental de la dinámica de sistemas. La creación y simulación de modelos utilizando software de modelado obliga a consolidar modelos mentales y permite observar el comportamiento de sistemas complejos, lo cual no es posible en los modelos mentales.

2.1 Software de simulación SIMILE

Los modelos cuantitativos de crecimiento y rendimiento buscan representar el bosque con ecuaciones matemáticas que describen su comportamiento en el tiempo. Sin embargo, entender los diversos componentes y supuestos de estos modelos puede ser difícil, por lo que éstos son tratados frecuentemente como “cajas negras” (Weiskittel 2014).

Los ambientes de modelado visual ‘icon-based’ pueden ayudar a revelar la estructura de un modelo y reducir el síndrome de la “caja negra” (Vanclay 2006). Una ventaja clave de estos ambientes de modelado visual es que el diagrama es a la vez el simulador, a diferencia de algunas antiguas aplicaciones donde el diagrama de la dinámica del sistema servía solo como documentación del modelo.

SIMILE (Simulistics Ltd.) es un lenguaje visual-declarativo para implementar modelos de simulación de sistemas dinámicos y discretos complejos en las ciencias de la tierra, ambientales y de la vida. Utiliza una tecnología de modelado declarativo, basado en la lógica para representar las interacciones de los componentes de un sistema de manera claramente estructurada y visualmente intuitiva. SIMILE proporciona una gama de herramientas para visualizar el comportamiento del sistema, utilizando gráficos, tablas o animaciones.

2.2 Índices de Competencia

En el modelado de árboles y bosques, un elemento crucial consiste en describir como el crecimiento de los árboles depende de interacciones entre éstos. La interacción conocida como “competencia” se ha usado para explicar la reducción o incremento en las dimensiones de un árbol, por ejemplo, el crecimiento diamétrico del tronco. Evidencia de esto es proporcionada por comparaciones empíricas entre árboles que crecen aisladamente y árboles que crecen dentro de una masa forestal. Los primeros tienden a tener mayor diámetro y ahusamiento que los segundos, cuando se comparan en sitios similares y en la misma etapa de desarrollo (Pommeraning y col., 2018). Vázquez y col. (2001) definieron competencia como el efecto que ejerce un árbol sobre otro, debido al consumo o al control que ejerce

sobre un recurso de disponibilidad limitada. Tal efecto puede llevar a una reducción en la supervivencia, crecimiento o reproducción del individuo afectado. De hecho los diámetros de los árboles que crecen aisladamente (“bajo crecimiento libre”) representan empíricamente los máximos que pueden ser alcanzados (Hasenauer 1997).

El argumento consiste en que los árboles que crecen en una masa forestal están sujetos a competencia o interactúan con los árboles adyacentes, a diferencia de los árboles que crecen aisladamente. Este razonamiento ha dado origen a un gran número de métodos para cuantificar la competencia entre árboles, mejor conocidos como índices de competencia.

Muchas variantes de índices de competencia han sido propuestas y sometidas a prueba Weiskittel y col. (2011) y Burkhart y Tomé (2012) presentan excelentes revisiones de los diferentes enfoques.

Según la clasificación más clásica existen dos clases de índices: a) espacialmente independientes (distance independent) y b) espacialmente explícitos o espacialmente dependientes (Munro 1974). En los primeros, los efectos de la competencia son introducidos a través de funciones simples de la cantidad y dimensiones de los individuos y sus distancias, pero no requieren del conocimiento de las coordenadas de los árboles. En los segundos, el efecto competitivo se describe por medio de expresiones matemáticas que incluyen las dimensiones y localización de cada árbol con respecto a un grupo de árboles circundantes considerados como competidores, teniendo en cuenta una determinada regla empírica. En este trabajo, para desarrollar un simulador dinámico de base individual, se usó una variante del índice espacialmente explícito conocido como índice de Hegyi (1974) que incluye la razón del tamaño y las distancias entre el árbol sujeto y sus competidores, así como las coordenadas espaciales de cada individuo. Weiskittel y col. (2011) resaltan el potencial de los índices del tipo Hegyi (Hegyi 1974, Holmes y col., 1991, Mailly y col., 2003). En Venezuela, se han desarrollado índices de competencia estáticos para plantaciones de teca (Vincent 1983, Jerez y col., 1999) y solo un modelo dinámico para plantaciones en líneas de *Tabebuia rosea* (Jerez 1992).

3 Materiales y Métodos

3.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó con datos de antaciones de teca (*Tectonagrandis* L. f.) establecidas en el Área Experimental Caparo de la Universidad de Los Andes, ubicada al suroeste del estado Barinas. La altitud promedio de 140 msnm. El clima es típico de la región llanera con variaciones locales, la precipitación promedio es de 1500 mm. La temperatura promedio es de 25°C con variaciones menores de 3°C entre el mes más caliente y el mes más fresco. Existe una estación seca bien definida comenzando en noviembre y terminando entre marzo y abril. La humedad relativa varía entre

59% en enero y 89% en junio. La zona es afectada por la convergencia intertropical con altas precipitaciones (Jerez y col., 1999).

3.2 Datos

Los datos provienen de parcelas experimentales medidas en ocasiones sucesivas (desde los 1,8 a los 45 años de edad). Las parcelas son rectangulares con superficies entre 600 y 1600 m², diferentes espaciamientos iniciales (2,0 × 2,0 a 4,0 × 4,0 m) y sometidas a diferentes regímenes de aclareo (remoción de árboles) en varias ocasiones (0 a 4) y con diferentes intensidades de extracción (20 a 50% de los árboles). Para estimar las relaciones de competencia se seleccionaron ocho parcelas permanentes caracterizadas por tener un índice de sitio de 23 m a la edad base de 16 años (Jerez y col., 1999). Las parcelas se separaron en cuatro grupos, considerando sus similitudes en cuanto a densidad, área basal y diámetro promedio (Jerez y col., 1999). En cada grupo se seleccionó aleatoriamente una parcela para desarrollar los modelos, quedando la restante para validación (Tabla 1).

Ta-

bla 1. Características generales de las parcelas permanentes de aclareo y rendimiento de teca seleccionadas para la muestra.

Parcela	Conjunto	Espaciamiento Inicial (m)	Superficie (m ²)	Número de aclareos	Densidad (arb ha ⁻¹)
3	Validación	2.5×2.5	1200	2	417
4	Desarrollo	2.5×2.5	1200	2	400
8	Validación	4.0×4.0	800	1	363
16	Desarrollo	4.0×4.0	600	1	317
9	Validación	3.0×3.0	800	1	388
11	Desarrollo	2.5×2.5	1000	2	400
6	Desarrollo	2.0×2.0	1200	0	1458
17	Validación	2.0×2.0	1600	0	1133

En las parcelas de desarrollo se tomó una muestra aleatoria del 30% de los árboles en categorías de diámetro de 2,5 cm de amplitud para su medición. Se descartaron árboles con daños y problemas fitosanitarios, igualmente aquellos con registros históricos incompletos. A estos árboles "sujeto" se les estimó su respuesta a la influencia ejercida por sus vecinos ("competidores"). A cada árbol se le midió diámetro a la altura de pecho (*d*) en cm; la altura total (m) y los diámetros de copa (m). Se hallaron las coordenadas rectangulares de cada árbol dentro de la parcela y de la zona de aislamiento externa a la parcela (Jerez y col., 1999).

Se determinó la relación entre el *d* y el diámetro de copa bajo condiciones de crecimiento libre (es decir, árboles que crecieron sin estar sujetos a competencia). Para ello, se seleccionó una muestra de 104 árboles de entre 10 y 20 años de edad, distribuida en categorías diamétricas de 2,5 cm de amplitud creciendo de manera aislada o en cercas. Estos, fueron individuos sanos y no bifurcados a menos de 3 m de altura. A cada árbol se le midió *d* (cm), la altura total (m) y diámetros de copa (m).

3.3 Construcción del modelo.

El modelo se basa en un algoritmo que calcula el crecimiento de cada uno de los árboles en función de su potencial de crecimiento restringido por la competencia de los árboles vecinos. Asimismo, incluye una función de mortalidad que define la probabilidad de muerte de un árbol en función de su tamaño y efecto de la competencia.

3.3.1 Modelo de competencia

El índice de competencia de Hegyi (1974) se expresa como la suma de las razones entre el diámetro del árbol sujeto y cada uno de sus competidores dividido por la distancia que existe entre ellos.

$$IC_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j/d_i}{dist_{i-j}} \quad (1)$$

donde: *IC_i* = índice de competencia para el árbol *i*, *d_j* = diámetro a la altura de pecho (cm) del árbol competidor *j*, *d_i* = diámetro del árbol sujeto (cm) y *dist_{i,j}* = distancia entre ambos árboles (m). Usualmente, los árboles competidores son aquellos que se encuentran dentro de un círculo de radio fijo alrededor del árbol sujeto. En el presente modelo, sin embargo, el módulo de competencia identifica los árboles que son competidores entre sí de acuerdo a un radio de búsqueda variable que depende del radio de copa de los árboles determinado en condiciones de crecimiento libre (Jerez y col., 1999):

$$R_c = \alpha_1 \times \left(\frac{d_c}{2}\right)^{\alpha_2} \quad (2)$$

Donde *R_c* y *d_c* son radio y diámetro de copa en metros respectivamente, y *α₁*, *α₂* son coeficientes estimados por regresión no lineal. Para determinar el radio de copa bajo condiciones de competencia se utilizó la siguiente fórmula:

$$R_c = \alpha_1 \times \left(\frac{d_c}{2}\right)^{\alpha_2} \times IC^{-\alpha_3} \quad (3)$$

Donde *IC* es el índice o grado de competencia al cual está sujeto un árbol y *α₃* es un parámetro a estimar. De esta manera a mayor *IC* menor es el radio de copa del árbol relativo al radio que alcanzaría bajo condiciones de crecimiento libre. Se considera que dos árboles están en competencia, cuando la suma de los dos radios de copa es igual o mayor a la distancia entre sus troncos. El grado de competencia ejercido sobre cada árbol viene dado por la suma de los valores parciales del índice de competencia y cada uno de sus competidores. Este índice varía dinámicamente a medida que unos árboles crecen más que otros o que algunos árboles mueren.

ciales de los árboles; 2) **Crecimiento**, el cual calcula el crecimiento diamétrico de los árboles sujetos a competencia; 3) **Par**: el cual establece una asociación entre cualquier par de individuos, sujeto al cumplimiento de una condición; 4) **Rodal**: presenta los resultados para variables a nivel de rodal, como por ejemplo diámetro promedio (cm), área basal (m^2/ha^{-1}) y diámetro de copa

El módulo de lectura de datos permite obtener las condiciones iniciales del modelo almacenadas en un archivo de texto (*.csv) que contiene información sobre posición de cada uno de los árboles en un eje de coordenadas x,y; así como el número de árbol y su diámetro. Esta información fue tomada en campo a los 3,4 años de edad.

Los datos para iniciar la simulación corresponden a los datos colectados de campo a la edad indicada. En este caso, se simuló una parcela de plantación aislada con una superficie de $1200 m^2$ ($40 \times 30 m$) a la edad de 3,4 años, que fue establecida con un espaciamiento inicial de $2,0 \times 2,0 m$ (densidad = $2500 \text{ árb } ha^{-1}$). A esta edad (tiempo 0) la densidad se encontraba en $2133 \text{ árb } ha^{-1}$. Una vez leídos los datos, el modelo calcula los radios de copa de cada árbol según (2), y se seleccionan los competidores j de cada árbol sujeto i si la suma de sus radios de copa es mayor que la distancia entre los centros de i y j . A partir de aquí, se calcula el IC de cada árbol de acuerdo a (1) y se recalcula el diámetro de copa según (3), es decir, inicialmente se asume que el diámetro de copa corresponde a árboles de crecimiento libre y si las copas se tocan, entonces se recalcula un nuevo diámetro de copa corregido por el nivel de competencia. Posteriormente, se calculan los coeficientes k_i y $d_{max,j}$ para cada árbol de acuerdo a su tamaño inicial y grado de competencia.

El sub-módulo de competencia consiste de una estructura especial de SIMILE (Association submodel) que permite establecer una asociación bidireccional entre objetos (e.j. el grado de competencia que un árbol ejerce sobre el otro y viceversa, de manera simultánea). Finalmente, los totales y promedios a partir del conjunto de árboles son calculados para generar resultados a nivel de rodal (e.j. diámetro promedio del rodal, área basal).

4 Discusión y resultados

Los ajustes de las ecuaciones a los datos pueden considerarse buenos ($r^2 > 0,80$ y todos los coeficientes con $p < 0,001$) (Tabla 2). La probabilidad de mortalidad de los árboles es mucho más alta para los árboles con diámetros menores a 10 cm, mientras que para árboles mayores de 20 cm es baja y relativamente estable (Fig. 2). Al inicio, el simulador genera las estadísticas de diámetro (d), diámetro de copa (d_{copa}), número de competidores (N_{comp}) e índice de competencia (IC) para cada árbol a la edad inicial (tiempo = 3,4 años). Asimismo, se generan las estadísticas para las variables a nivel de rodal (Tabla 3). Estos valores son calculados por el modelo a partir de las mediciones de campo. La Fig. 3a muestra la ubicación espacial de los árboles en campo y

su diámetro de copa al inicio de la simulación. A continuación se realizó una sola corrida del modelo desde la edad inicial (3,4 años) hasta los 38,8 años de edad, a la cual se realizó la última medición para esta parcela.

Tabla 2. Coeficientes ajustados para las ecuaciones del modelo. Todos los coeficientes significativos ($P < 0.001$).

Ecuación	Parámetro	coeficiente	r^2
2	α_1	0,4747	0,982
	α_2	0,8493	
3	α_3	0,15	0,901
	d_{max}	60	
4-5	k_{max}	0,13	0,872
	m	0,30	
	B	-3,050	
6	γ	-0,0403	0,941
7	μ	5,100	0,983
11	\hat{o}	-10,200	0,776

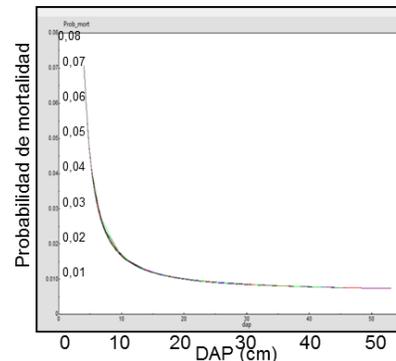


Fig. 2 Probabilidad de mortalidad de los árboles como función del diámetro a la altura de pecho (d).

Debe tomarse en cuenta que la parcela original estaba rodeada por otros árboles de teca, mientras que la parcela simulada considera que los árboles de borde no presentan competencia por el lado externo, por lo que se espera que éstos presenten tamaños superiores a los que tendrían si estuvieran totalmente rodeados por otros árboles (Fig. 3b). Burkhardt y col., 2012).

El crecimiento en d y d_{copa} para los árboles individuales muestran tendencia a mayor dispersión al final de la simulación (Tablas 3 y 4), consecuencia de que un porcentaje de árboles se mantuvieron en diámetros muy bajos debido a la competencia ejercida por los árboles de mayor tamaño.

Mientras que a los 3,4 años la mayoría de los árboles estaban entre 4 y 15 cm de d , para el año 38,8 el árbol más pequeño está cerca de los 12 cm, existiendo una cantidad importante de árboles que mantuvieron crecimientos muy bajos, mientras que los mayores árboles, situados en los bordes, superaron los 50 cm en algunos casos.

Tabla 3 Estadísticas descriptivas de las condiciones iniciales promedio de los árboles del rodal (a los 3,4 años de edad). Los valores iniciales fueron medidos en campo y constituyen las condiciones iniciales para la simulación del rodal.

	Avg	Min	Max	STD	CV%
d (cm)	8,8	4,0	15,9	1,7	19,6
d_{copa} (m)	2,6	1,3	4,5	0,5	19,2
IC	2,8	0,7	5,0	0,8	29,0
N_{comp}	6,1	2,0	10,0	1,6	26,8

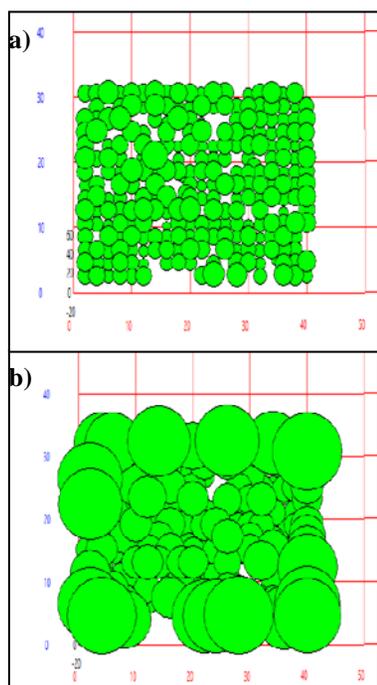


Fig. 3. Corrida del modelo: Salida gráfica mostrando la posición relativa de cada árbol en el plano yx (distancia en metros). Los círculos representan el diámetro de copa (m). a) al inicio de la simulación, edad = 3,4 años; b) al final de la simulación, edad= 38,8años.

Tabla 4 Estadísticas descriptivas de las condiciones finales promedio de los árboles del rodal (a los 38,8 años de edad).

	Avg	Min	Max	STD	CV%
d (cm)	21,6	12,9	53,1	8,1	37,4
d_{copa} (m)	5,2	3,1	13,3	1,9	37,6
IC	4,9	1,3	7,9	1,3	27,0
N_{comp}	18,3	9,0	29,0	4,0	22,0

Esto debido a la competencia reducida a la que estuvieron sujetos (Fig. 3b) los árboles de las filas externas, ya que estos están libres de competencia por un lado, por lo que la mortalidad en esas hileras fue menor a lo esperado y el crecimiento de estos se aproxima más a condiciones de crecimiento libre. En plantaciones de teca sin aclareo, se

espera que la mayor parte de los árboles permanezcan en diámetros reducidos con respecto al potencial de crecimiento diamétrico en ausencia de competencia (Vincent y col., 2000). En la realidad, los árboles que crecen en los bordes de las plantaciones presentan un diámetro de copa muy asimétrico, con la copa mostrando mucho mayor desarrollo hacia el exterior de la plantación. El número de competidores y el IC también aumentaron considerablemente con la edad, pero sus valores presentaron menor dispersión al final de la simulación. El IC a nivel individual presentó una alta variabilidad, pero tendió a estabilizarse para cada árbol al final de la simulación (Fig 4b) Al analizar las variables a nivel de rodal (Tabla 5), se aprecia una mortalidad (reducción en la densidad) cercana al 30%, la cual se aproxima a los valores observados para plantaciones reales, sin embargo la misma fue considerablemente menor a la observada en la parcela simulada.

Por otro lado, la función de mortalidad ajustada en (11), considera la probabilidad de muerte de acuerdo al diámetro de los árboles y el IC , pero no considera el posible efecto del tiempo transcurrido, ya que a cada paso el modelo recalcula la probabilidad de mortalidad del árbol. Las Fig. 5 y 6 presentan las trayectorias de las variables de rodal: densidad, área basal, índice de densidad delrodal ($IDR = densidad \times (d/25)^{1,605}$ (Jerez y col., 2003) y diámetro promedio.

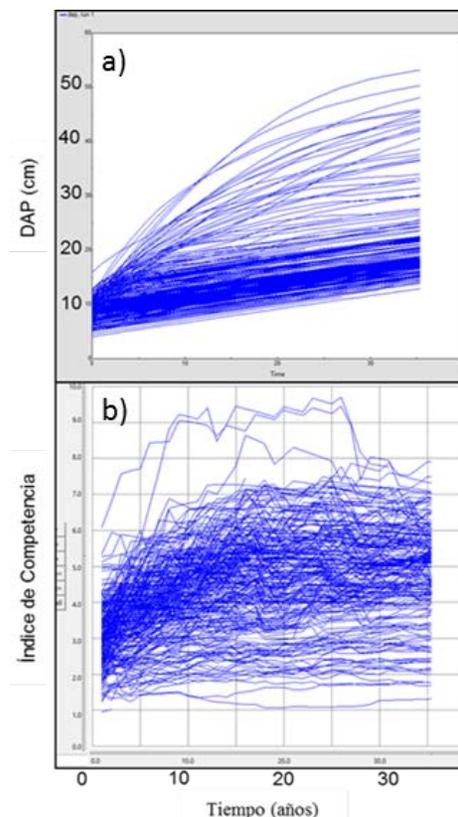


Fig. 4 Corrida del modelo entre 3,4 y 38,8años de edad (tiempo 0 a 35):Salidas gráficas a) crecimiento en diámetro a la altura de pecho (d)

para cada árbol del rodal; b) variación del índice de competencia para cada árbol sujeto.

Tabla 5 Variables de rodal a los 3,4 años y 38,8 años de edad para la parcela real y la simulada.

Caso	Edad (años)	Densidad (árb ha ⁻¹)	d (cm)	G (m ² ha ⁻¹)	IDR (árb ha ⁻¹)
Real/simulada	3,4	2133,0	8,83	13,56	391,29
Simulada	38,8	1558,3	21,61	65,12	1198,16
Real	38,8	1100,0	21,84	41,20	886,50

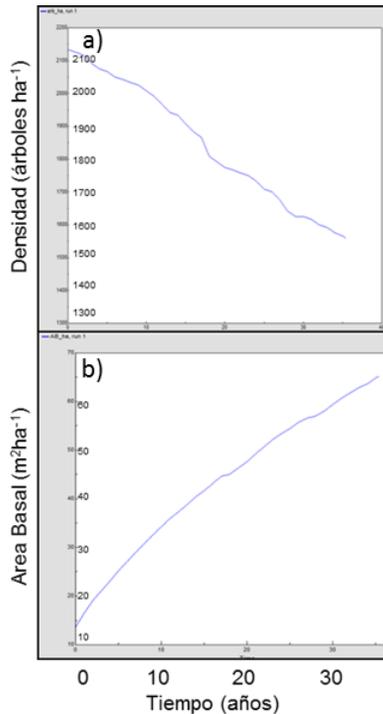


Fig. 5. Corrida del modelo entre 3,4 y 38,8 años de edad (tiempo 0 a 35): Salidas gráficas a) Reducción en la densidad del rodal (mortalidad natural debida a la competencia); b) crecimiento en el área basal del rodal.

Como consecuencia de la alta competencia, el IDR se aproxima a los máximos observados en plantaciones de teca no sujetas a aclareos (Kumar y col., 1995, Jerez y col., 2003, Ariasy Camacho 2004), sin embargo, el crecimiento real mostró un IDR considerablemente menor de alrededor de 887 árboles/ha. Igualmente, el *dse* corresponde con los diámetros observados para parcelas no aclareadas. No obstante, el área basal simulada es considerablemente mayor a la observada (65,1 contra 41,2 m²ha⁻¹). En general, los rodales no aclareados de teca pueden alcanzar valores superiores a los 60 m²ha⁻¹ en calidades de sitio I, pero en calidades de sitio inferiores, estos valores pueden estar por debajo de 40. Por otro lado, en general, el IDR máximo se considera no afectado por la calidad de sitio (Long y col., 2004). En todo caso, para efectos comparativos, el presente prototipo tiene la limitación de que considera la parcela como un

rodal aislado, mientras que los datos disponibles son todos de parcelas que se han desarrollado dentro de una masa forestal, es decir, no tienen efecto de borde.

5 Conclusiones

El modelo desarrollado presenta un comportamiento razonable y puede ser mejorado considerablemente, sirviendo como base para probar diferentes índices de competencia.

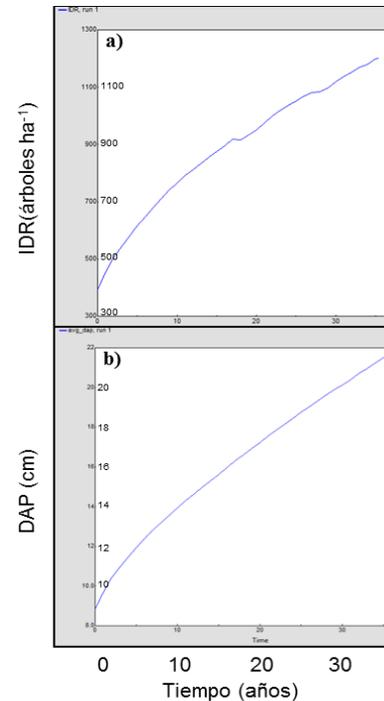


Fig. 6. Corrida del modelo entre 3,4 y 38,8 años de edad (tiempo 0 a 35,4): Salidas gráficas a) Incremento en el Índice de densidad del rodal; b) Incremento del diámetro promedio del rodal.

Dado que el modelo tiene un componente aleatorio, se sugiere realizar validaciones ejecutando varias corridas para una misma parcela. Igualmente, se puede simular el crecimiento de otras plantaciones de las cuales se disponga de datos iniciales de coordenadas y dimensiones de los árboles. Una considerable mejora se puede lograr, al modificar el software para que la competencia ejercida sobre los árboles de "borde" incluya también el efecto de los árboles externos a la plantación. Desafortunadamente, en la práctica, los árboles de la zona de aislamiento no son medidos, por lo que una solución implica descartar de la simulación las filas externas. Finalmente, si se dispone de información de crecimiento en plantaciones conformadas por varias especies (plantaciones mixtas), es posible modificar este modelo para representar este tipo de sistema forestal. Estos modelos son también muy útiles para representar los efectos del manejo, particularmente regímenes complejos de aclareos y podas.

6 Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA), de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, bajo el proyecto F0-725-13-01-B.

Referencias

- Arias AD, Camacho P, 2004, Validación del Índice de Densidad del Rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectonagrandis* en el trópico, Kurú: Revista Forestal (Costa Rica), Vol. 1, pp. 1-7.
- Brand D, Magnussen A, 1988, Asymmetric, two-sided competition in even-aged monocultures of red pine, Canadian Journal of Forest Research, Vol. 18, pp. 901-910.
- Burkhardt HE, Tomé M, 2012, Modeling Forest Trees and Stands. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 457.
- Forrester J, Whelan J, 1994, Modeling exercises section 1, System Dynamics in Education Project, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, May, 1994, pp.52.
- Hasenauer H, 1997, Dimensional relationships of open-grown trees in Austria, Forest Ecology and Management, Vol. 96, pp. 197-206.
- Hegyi F, 1974, A simulation model for managing jack-pine stands. En Fries, J. (Ed.), Growth Models for Tree and Stand Simulation. Research Note 30. Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden, pp. 74-90.
- Holmes MJ, Reed DD, 1991, Competition indexes for mixed species northern hardwoods, Forest Science, Vol. 37, pp.1338-1349.
- Jerez M 1992, Un modelo de simulación del crecimiento para plantaciones en líneas "Método Caparo". Tesis M.Sc., Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Instituto de Estadística Aplicada y Computación, Mérida, Venezuela, pp. 110.
- Jerez M, Vincent L, Moret A, González R, 2003, Regímenes de Espaciamiento Inicial y Aclareo en Plantaciones de Teca en Venezuela. Seminario y Grupo de Discusión Virtual en Teca (*Tectonagrandis* L.), Heredia, Costa Rica, Noviembre 26-28 2003.
- Jerez M, Quintero M, Quevedo A, Moret A, 2015, Simulador de crecimiento y secuestro de carbono para plantaciones de teca en Venezuela: una aplicación en SIMILE, Bosque, Vol. 36, 519 – 530
- Jerez M, Vincent L, Moret AY, 1999, Un modelo de competencia para las plantaciones de teca del área experimental de la reserva forestal Caparo (Barinas-Venezuela). Revista Forestal Venezolana, Vol. 43, pp. 157-171
- Kumar BM, Long JN, Kumar P, 1995, A density management diagram for teak plantations of Kerala in peninsular India, Forest Ecology and Management, Vol. 74, pp. 125-131
- Long JN, Dean TJ, Roberts SD, 2004, Linkages between silviculture and ecology: examination of several important conceptual models, Forest Ecology and Management, Vol. 200, pp. 249-261.
- Maily D, Turbis S, Pothier D, 2003, Predicting basal area increment in a spatially-explicit, individual tree model: a test of competition measures with black spruce, Canadian Journal of Forest Research, Vol. 33, pp. 435-443.
- Muetzelfeldt R, Massheder J, 2003, The Simile visual modelling environment, European Journal of Agronomy, Vol. 18, pp. 345-358
- Munro DD, 1974, Forest growth models -a prognosis. En J. Fries (Ed.), Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forest Research, Stockholm, Notes 30, pp. 7-21.
- Pommerening A, Sánchez Meador AJ, 2018, Tamm review: Tree interactions between myth and reality, Forest Ecology and Management, Vol. 424, pp. 164-176.
- Quintero MA, Jerez M, Flores J, 2012, Modelo de crecimiento y rendimiento para plantaciones de teca (*Tectonagrandis*L.) usando el enfoque de espacio de estados, Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 33, No.1, pp. 33-42.
- Tomé M, Burkhardt H, 1989, Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees, Forest Science, Vol. 35, No. 3, pp. 816-831.
- Vanclay JK, 2003, The one-minute modeller: an introduction to simile, Annals of Tropical Research, Vol. 25, pp. 31-44.
- Vanclay JK, 2006, Spatially-explicit competition indices and the analysis of mixed-species plantings with the SIMILE modelling environment, Forest Ecology and Management, Vol. 233, pp. 295-302.
- Vázquez J, Lago J, González A, 2001, Programa para el cálculo de índices de competencia de especies forestales, Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Huelva, Crta. Palos - La Rábidas/n. 21819 Palos de la Frontera (Huelva).
- Vincent L, 1983, Modelos de índice de competencia en plantaciones jóvenes de teca en la Reserva Forestal de Caparo, Edo. Barinas, Venezuela, Trabajo de Ascenso, Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrados. Mérida, Venezuela, pp. 183.
- Vincent L, Moret AY, Jerez M, 2000, Comparación de algunos regímenes de espesura en plantaciones de teca en el área experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela, Revista Forestal Venezolana, Vol. 44, pp.87-95.
- Weiskittel A, Hahn D, Kershaw JA, Vanclay JK, 2011, Forest Growth and Yield Modeling. Wiley-Blackwell, pp. 415.
- Weiskittel A, 2014, Forest Growth and Yield Models for Intensively Managed Plantations, En: Borges JG, Diaz-Balteiro L, McDill ME, Rodriguez LCE (Ed.), The Management of Industrial Forest Plantations. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 61-90.

Recibido: 15 de noviembre de 2017

Aceptado: 16 de mayo de 2018

Jerez, Mauricio: Ing. Forestal, M.Sc. en Estadística Aplicada (ULA), Ph.D. en Manejo Ecológico de Bosques, Louisiana State University, EEUU. Profesor Titular (J) del Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP), Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA

Rubio, Michail: Ingeniero de Sistemas (ULA). Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: michail_ing_sistemas@hotmail.com

Quevedo, Ana: Ing. Forestal, M.Sc. en Manejo de Bosques (ULA), Dra. En Ecología Tropical (ULA), Profesora Titular de la Escuela Técnica Superior Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: anamer2@gmail.com

Jerez, Carlos: Ing de Sistemas, M.Sc. en Automatización e Instrumentación (ULA), Ph..D. en Ciencias Ambientales, University of North Texas, EEUU., Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: cij0047@gmail.com.

Quintero, María: Ing. de Sistemas, M.Sc. en Estadística Aplicada (ULA), Dra. en Ciencias Aplicadas (ULA), Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: mariaq@ula.ve

Vincent, Lawrence: Ph.D. en Ecología (University of Tennessee), Forest Biopower 1544 Old NM HWY 3 San Cristobal, NM, EEUU. Correo electrónico: mail@forestbiopower.com