

# Gavilán: un modelo para simulación del crecimiento, rendimiento y cambios florísticos de los bosques centroamericanos dominados por *Pentaclethra macroloba*

Almeida Siteo,  
Bryan Finegan,  
Alain Franc

## RESUMEN

La teoría de claros fué utilizada para construir un modelo de parche para simular dinámica de rodales e intervenciones silviculturales en los bosques húmedos de bajura de Centroamérica. Los datos utilizados fueron obtenidos de parcelas de muestreo permanente medidas a lo largo de 10 años. Todas las 250 especies de árboles con diámetro a la altura del pecho ( $dap \geq 10$  cm) fueron identificadas botánicamente. Los resultados de las simulaciones muestran que el modelo puede representar muchas de las características de los bosques de *Pentaclethra* para los cuales fue diseñado. Para simulaciones de 200 años sin intervención, usando datos de tres parcelas de una hectárea cada una ubicada en la Tirimbina, Costa Rica, se obtuvieron tasas anuales de mortalidad de 1-3%, una densidad de 400-500 árboles/ha y áreas basales de 25-30  $m^2 ha^{-1}$ . La comparación entre el incremento del dap simulado y observado durante ocho años (1990-1998) produjo una eficiencia de modelaje  $E$  de 0.39, lo cual es considerado bueno para la complejidad del bosque y la estructura del modelo utilizado. Simulaciones con intervenciones silviculturales sugieren que los tratamientos son necesarios para sostener una cosecha de madera de 20  $m^3 ha^{-1}$  en ciclos de corta de 20 años, como sugiere la Comisión Nacional de Certificación Forestal de Costa Rica (CNCF). La composición y riqueza de especies, así como la estructura diamétrica, aunque sean afectadas a corto plazo por el aprovechamiento y los tratamientos silviculturales, pueden mantenerse a largo plazo por la recuperación rápida del bosque.

**Palabras clave:** Bosque tropical húmedo; aclareo; *Pentaclethra macroloba*; simulación; modelos de simulación; crecimiento; rendimiento; América Central.

## SUMMARY

**Gavilán: A simulation model for growth, yield and floristic changes for Central American Forests dominated by *P. macroloba*.** Gap model theory was used to develop a patch model to simulate stand dynamics and silvicultural interventions in Central American lowland tropical rain forests. Data from permanent sample plots measured over a 10 year period were used. Data included botanical identification of the 250 tree species with diameter at breast height ( $dbh \geq 10$  cm). The general findings are that the model accurately represent most of the characteristics of *Pentaclethra* forests, for which it was developed. Using a 200 year simulation of forest without further disturbance, using data from three 1-ha logged plots at Tirimbina, Costa Rica the model predicted annual mortality rates of 1-3%, stand density of 400-500 trees per hectare and 25-30  $m^2 ha^{-1}$ . The comparison between simulated and observed dbh increment (eight years – 1990-1998) resulted in a modelling efficiency  $E$  of 0.39, which is considered good for the complexity of the forest and model structure. Simulations of 200 years with silvicultural interventions suggest that silvicultural treatments are required to sustain a logging intensity of 20  $m^3 ha^{-1}$  over time with cutting cycles of 20 years as suggested by the Costa Rican Forest Certification Commission (CNCF). Although composition and richness as well as stand diameter distribution, are affected in the short term by logging and silvicultural treatments species, they could be maintained in the long term as a result of the quick recovery of the forest stand.

**Keywords:** Humid tropical forest; *Pentaclethra macroloba*; simulations; simulation models; growth; yield; América Central.

La simulación del desarrollo de los bosques a través del uso de modelos matemáticos es una técnica que permite evaluar posibles respuestas de estos ecosistemas cuando son sometidos a tratamientos silviculturales o aprovechamientos (Vanclay 1994). Sin embargo, y pese al gran esfuerzo de crear este tipo de modelos (Vanclay 1994, Alder 1995), en los bosques tropicales esta técnica ha sido poco utilizada. La complejidad de estos ecosistemas en términos de composición de especies y su estructura disetánea (árboles con varios tamaños y edades en el mismo rodal) han sido indicadas como las principales razones de la falta de modelos adecuados para representar su dinámica.

De hecho, en los bosques tropicales se pueden encontrar centenares de especies arbóreas ( $dap \geq 10$  cm) en una sola hectárea (Swaine *et al.* 1987, Finegan *et al.* 1999). La mayoría están representadas por pocos árboles. Un buen ejemplo de esta diversidad lo representan los bosques de *Pentaclethra macroloba* en la vertiente atlántica de Centroamérica, donde en sitios de investigación a largo plazo del CATIE se han identificado hasta 250 especies en nueve hectáreas. Las 10 especies más abundantes representan cerca del 40% del número total de árboles; el restante 60% es ocupado por la mayoría de las especies que a menudo tienen una presencia de menos de un árbol por hectárea (UMBN, sin publicar). La poca abundancia de la mayoría de las especies plantea dificultades de muestreo de especie, desde su identificación botánica, y para propósitos de modelaje requiere que muchas de ellas sean agrupadas de acuerdo a ciertos criterios, de crecimiento, tamaño del adulto o de ambos.

La información que se utilizó en el desarrollo de este modelo se consiguió en un bosque muy húmedo tropical dominado por *P. macroloba*, en la vertiente atlántica de Costa Rica, con base en un experimento con parcelas permanentes de muestreo (PPM) con información de 10 años de mediciones (1988-1998) disponible para el presente trabajo. Los árboles fueron medidos siguiendo las

técnicas descritas en Alder y Synnott (1992) e identificados a nivel de especie por Nelson Zamora del Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio) de Costa Rica.

El objetivo de esta investigación es presentar un modelo de crecimiento y rendimiento basado en la teoría de dinámica de claros (Shugart 1984, Botkin 1993). El modelo, llamado *Gavilán*, está basado en la simulación del reclutamiento, crecimiento y mortalidad a nivel del árbol individual usando la información de todo el periodo de estudio y la información existente acerca de los bosques de *Pentaclethra* en la región, particularmente en la estación biológica La Selva (McDade *et al.* 1994) y en sitios de investigación a largo plazo denominados Corinto (Costa Rica, sitio del CATIE), La Lupe y Los Filos (Nicaragua, sitios de la Universidad Centroamericana, UCA, Managua) (Sitoe 2000). El estudio y evaluación del modelo se describen detalladamente en Sitoe (2000).

La teoría de modelos de claros es adaptada a las condiciones del bosque tropical, destacándose en el proceso de adaptación el proceso de agrupamiento de especies y los procedimientos desarrollados para simular el reclutamiento. Además, ninguno de los modelos de claro hasta la fecha desarrollados para bosques tropicales (por ejemplo: Doyle 1981, Desanker y Prentice 1994) incorpora prácticas silviculturales; por ello el componente silvicultural (aprovechamiento y tratamientos silviculturales) de *Gavilán* es importante y novedoso. Vanclay (1995) sugiere que modelos basados en árboles individuales, de los cuales los modelos de claros como el *Gavilán* son parte, pueden ofrecer una mejor opción de simulación real de las prácticas silviculturales selectivas comúnmente aplicadas en el trópico. La técnica de modelo de claros fue seleccionada para el presente trabajo, entre otras razones, por su flexibilidad de utilizar árboles individuales y emplear datos que se pueden obtener con procedimientos corrientes de medición de parcelas permanentes de muestreo. Sin embargo, debido a que *Gavilán* difiere de los modelos de claro anteriores porque sus simulaciones

parten de un rodal disetáneo existente, y no de terreno abierto, se le denomina un modelo de parche y no de claro (Sitoe 2000).

### Desarrollo del modelo

El modelo *Gavilán* (Sitoe 2000) fue preparado para el ambiente Windows 98. Los datos de ocho años (1990-1998) del sitio de investigación La Tirimbina fueron usados para ajustar las funciones de crecimiento y los procedimientos de reclutamiento y mortalidad natural. De acuerdo con los principios básicos de los modelos de claros (Shugart 1984, Botkin 1993), *Gavilán* simula la dinámica del bosque como la suma de la dinámica de una serie de parches pequeños individuales, que fueron definidos como cuadrados de 20 m x 20 m. *Gavilán* maneja información para más de 250 especies arbóreas individuales. Sin embargo, el crecimiento y la dinámica poblacional de la mayoría de las especies, debido a los pocos individuos por especie presentes en las PPM, deben obligatoriamente ser simulados utilizando parámetros a nivel de grupos de especie. Dichos grupos fueron delimitados utilizando análisis multivariado con base en las tasas de crecimiento observadas en las PPM y el tamaño del árbol adulto de cada especie. Inevitablemente, el individualismo de las especies biológicas no se simula de forma adecuada a través de este procedimiento, pero sí se manifiesta en las simulaciones al tomarse en cuenta la abundancia inicial y el gremio de regeneración de cada especie en la simulación del reclutamiento. La abundancia de una especie entre los reclutas es una función de la abundancia de esa especie en el bosque al comienzo de determinados periodos de simulación. En simulaciones sin intervención, se utiliza la abundancia en el bosque original, mientras que en simulaciones con intervenciones el valor de la abundancia de cada especie que se utiliza para simular el reclutamiento se actualiza cada 20 años, permitiéndose así la simulación de cambios de abundancia de especies en relación a la intervención. En cuanto al gremio de regeneración, el modelo identifica

<sup>1</sup> Heliófitas: especies que requieren niveles elevados de luz para su regeneración y establecimiento.

parches donde por la tala o la muerte natural de un árbol existe un claro durante un periodo determinado de simulación. Las especies previamente identificadas como heliófitas<sup>1</sup> (por ejemplo Finegan *et al.* 1999) tienen mayor probabilidad de establecerse en tales claros, mientras que aquellas con tendencia generalista en sus requerimientos para la regeneración (esciófitas que toleran pero no requieren sombra) tienen mayor probabilidad de establecerse en los parches sin claros. Por último, los procedimientos para aprovechamientos y tratamientos silviculturales fueron diseñados para cortas selectivas con raleos de liberación post-aprovechamiento, dentro de un marco de sistemas silviculturales policíclicos (Lamprecht 1990, Whitmore 1990).

### El funcionamiento del modelo

En este punto se describen simulaciones hechas con *Gavilán*, donde los valores de las variables simuladas son promedios derivados de 20 repeticiones de tipo Monte Carlo (Sokal y Rohlf 1995). Las simulaciones parten de los datos reales de las parcelas testigo del sitio Tirimbina (tres parcelas de una hectárea cada una, con aprovechamiento pero sin tratamiento). Una primera simulación se ejecutó sin intervenciones con el fin de verificar la capacidad del modelo de mantener las características del bosque de *Pentaclethra* durante muchos años – este es un elemento de la evaluación del realismo del modelo. La segunda simulación se ejecutó con aprovechamientos e intervenciones silviculturales con el fin de evaluar su efecto en la productividad y las características florísticas del bosque. El aprovechamiento aplicado fue de  $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y se permitió que el tratamiento silvicultural eliminara hasta 40% del área basal inicial de rodal. Las especies comerciales vedadas por la Ley Forestal de Costa Rica (por ejemplo, *Sclerolobium costaricense*) fueron protegidas en los procesos de aprovechamiento y tratamientos silviculturales.

En la simulación sin intervención, *Gavilán* mantuvo las características de un bosque no-intervenido de *Pentaclethra* durante 200 años. Tanto los parámetros estructurales del bosque (Figura 1) como la diversidad de especies (Figura 2), las tasas de mortalidad (valores del coeficiente exponencial de mortalidad en el rango 1-3%) y reclutamiento (6-10 reclutas/ha al año) se mantuvieron dentro del rango observado en los bosques de *Pentaclethra* descritos por Lieberman *et al.* (1985) y Swaine *et al.* (1987). El modelo simula así la dinámica típica de los bosques de *P. maculosa* descritos como los más dinámicos entre los bosques tropicales húmedos de baja (Swaine *et al.* 1987). Las tasas de incremento diamétrico fueron analizadas con detalle y se observó que las funciones y procedimientos utilizados producen una eficiencia de modelaje de 0,39, un valor considerado como razonable para la estructura de modelo y los datos utilizados. Con base en todo lo anterior se concluye que el modelo es confiable para hacer simulaciones de la dinámica del bosque a corto plazo.

Al final de 200 años de simulación sin intervención se observó que la curva rango abundancia del bosque simulado se mantiene muy parecida a la curva obtenida con da-

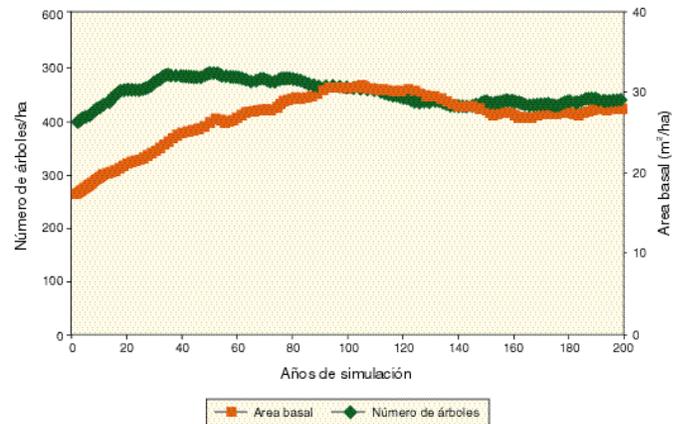


Figura 1. Parámetros estructurales producto de la simulación sin intervención. Bosque La Tirimbina, Costa Rica.

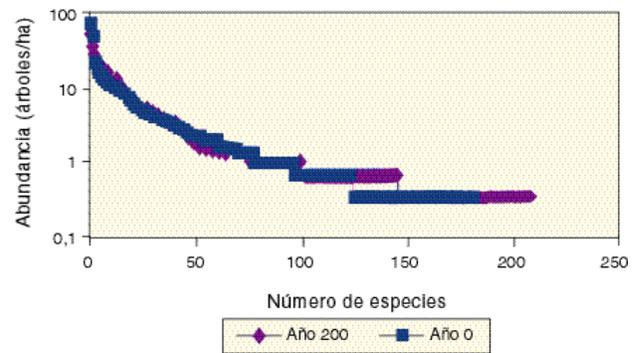


Figura 2. Distribuciones rango-abundancia de los datos de campo (Año 0) y a los 200 años de la simulación (Año 200).

tos observados del bosque al comienzo de la simulación (Figura 2). Este resultado se obtuvo a través de los procedimientos del modelo que asumen que a nivel de especies, el reclutamiento está correlacionado con la abundancia inicial, y que especies no presentes al inicio de la simulación pueden ser reclutadas posteriormente. La presencia de un número mayor de especies en el año 200 en comparación con el estado inicial (observado) se debe a que el estado inicial observado es post-aprovechamiento y algunas especies representadas por pocos individuos pudieron ser temporalmente eliminadas de las parcelas como consecuencia del aprovechamiento y los daños resultantes.

A partir de esta simulación se observaron otros parámetros como la distribución diamétrica en diferentes periodos y se descubrió que la estructura del bosque no cambia de manera significativa, por esto mantiene la estructura de un bosque primario intervenido.

En cuanto a la intervención del bosque, con las condiciones de simulación indicadas es posible mantener una cosecha de madera de  $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  en cada operación de aprovechamiento (Cuadro 1) durante varios años, aunque pasado un tiempo este volumen puede ser menor (por ejemplo el año 160). En la mayoría de los casos, el volumen aprovechado de las especies deseables y aceptables, excepto *P. maculosa*, es aprovechado en su totalidad, mientras que el

*Pentaclethra* mantiene un volumen aprovechable que no es totalmente cosechado.

El efecto de los tratamientos silviculturales consiste, entre otros, en bajar la densidad de especies no comerciales para crear mejores condiciones de establecimiento y crecimiento para los árboles comerciales. Los tratamientos silviculturales de liberación aplicados sucesivamente en esta simulación resultaron en una reducción de más del 60% del volumen inicial de especies no comerciales y un aumento cercano al 100% del volumen inicial de especies aceptables y deseables (Figura 3). Cuando no se aplica tratamiento silvicultural, manteniendo el mismo esquema de aprovechamiento, el volumen aprovechable decrece con el tiempo hasta grados muy bajos que no vuelven a recuperarse (Cuadro 1).

Las simulaciones presentadas sugieren que el nivel de aprovechamiento recomendado para los bosques húmedos de bajura en Costa Rica (CNFC 1999) puede ser mantenido a largo plazo si se aplican tratamientos silviculturales que favorezcan el establecimiento y crecimiento de especies comerciales. La falta de tratamientos silviculturales da ventaja a las especies no comerciales y ocasiona una degradación del valor comercial del bosque.

**Agradecimiento.** El autor agradece a Christoph Kleinn, José Joaquín Campos, William Parton y Florencia Montagnini por sus aportes al desarrollo de este trabajo.

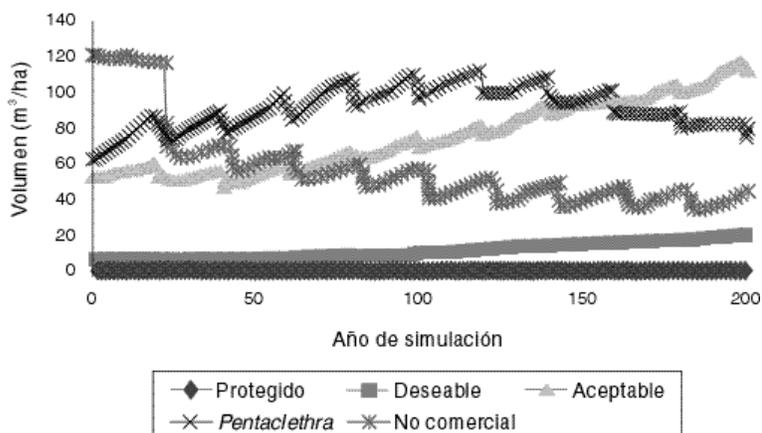
Almeida Siteo  
 Doctor en Ciencias Forestales  
 Universidade Eduardo Mondlane,  
 CP 257, Maputo, Mozambique  
 Tel: (258) 149-6238  
 sittus@zebra.uem.mz

Bryan Finegan,  
 7170, CATIE  
 bfinegan@catie.ac.cr

Alain Franc, Ecole Nationale du Génie  
 Rural, des Eaux et des Forests  
 Avenue du Maine 19,  
 Paris, France  
 franc@engref.fr

**Cuadro 1.** Volumen comercial aprovechado por grupo comercial con y sin tratamiento silvicultural. La Tirimbina, Costa Rica.

Año	a) Con tratamiento silvicultural				b) Sin tratamiento silvicultural			
	Deseable	Aceptable	<i>Pentaclethra</i>	Total	Deseable	Aceptable	<i>Pentaclethra</i>	Total
20	1,35	7,44	11,31	20,1	1,34	6,9	12,5	20,74
40	0	6,74	13,38	20,12	0	8,34	11,72	20,06
60	0	10,04	10,68	20,72	0	6,08	15,42	21,5
80	1,38	5,37	14,8	21,55	1,38	3,77	16,23	21,38
100	0	4,79	16,68	21,47	0	1,65	20,11	21,76
120	0	3,46	17,29	20,75	0	0	15,14	15,14
140	0	7,91	11,37	19,28	0	7,77	9,38	17,15
160	0	6,53	10,53	17,06	0	3,7	3,74	7,44
180	1,65	5,36	13,05	20,06	1,37	1,59	5,52	8,48



**Figura 3.** Simulación de las tendencias del volumen en diferentes grupos de especies, con la aplicación de tratamientos silviculturales.

**Literatura citada**

Alder, D. 1995. Growth modelling for mixed tropical forests. Oxford Forestry Institute, G.B. Tropical Forestry Paper no. 30.231p.

Alder, D; Synnott, T.J. 1992. Permanent sample plots techniques for mixed tropical forests. Oxford Forestry Institute, G.B. Tropical Forestry Paper no. 25.124p.

Botkin, DB. 1993. Forest dynamics: an ecological model. Oxford, U.K. Oxford University Press. 309p.

CNFC (Comisión Nacional de Certificación Forestal, CR). 1999. Estándares y procedimientos para el manejo sostenible y la certificación forestal en Costa Rica. San José, Costa Rica 54p

Desanker, P; Prentice, IC. 1994. MIOMBO – a vegetation dynamics model for the miombo woodlands of Zambezia Africa. For. Ecol. Manage 69:87-95.

Doyle TW. 1981. The role of disturbance in the gap dynamics of a montane rain forest: an application of a tropical forest succession model. In West, DC; Shugart, HH; Botkin, DB eds. forest succession: concepts and applications. New York, Springer Verlag. p. 57-73.

Finegan, B; Camacho, M; Zamora, N. 1999. Diameter increment patterns among 106 tree species in a logged and silviculturally treated Costa Rican rain forest. For. Ecol. Manage. 121:159-176.

Lamprecht, H. 1990. Silviculture in the tropics. Eschborn, Germany. 335p.

Lieberman, D; Lieberman, M; Peralta, R; Hartshorn, GS. 1985. Mortality patterns and stand turnover rates in a wet tropical forest in Costa Rica. J. Ecol. 73:915-924.

McDade, L; Bawa, KS; Hespenheide, HA; Hartshorn, GS Eds. 1994. La Selva: ecology and natural history of a neotropical rain forest. Chicago, The University of Chicago Press. 486 p.

Shugart, HH. 1984. A theory of forest dynamics: the ecological implications of forest succession models. New York. Springer-Verlag. 278p.

Siteo, AA. 2000. A Patch model for managed tropical lowland rain forests in Costa Rica. Ph.D. Dissertation. Turrialba, Costa Rica, CATIE-CSU.

Sokal, RR; Rohlf, FJ. 1995. Biometry. 3 ed. New York, WH Freeman. 887p.

Swaine, MD; Lieberman, D; Putz, FE. 1987. The dynamics of tree populations in tropical forest: a review. J. Trop. Ecol. 3:357-366.

Vanclay, JK. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. UK, CAB International. 312 p.

Vanclay, JK. 1995. Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. Forest Science 41:7-42.

Whitmore, TC. 1990. An introduction to tropical rain forests. Oxford, U.K. Clarendon Press. 226p.