

## Modelos de crecimiento y rendimiento

Fernández Tschieder, Ezequiel; Goya, Juan F. y Achinelli, Fabio

### Introducción

La estimación del crecimiento y rendimiento – del volumen de madera comercial o total - es una de las principales actividades llevadas a cabo por los forestales de todo el mundo. La toma de decisiones en la gestión forestal y la planificación silvicultural en relación a la combinación de los factores de la producción requiere de estimaciones precisas del crecimiento y rendimiento, así como de los productos obtenidos de las distintas combinaciones de los factores y tratamientos. En el caso del manejo forestal, estas estimaciones se han realizado tradicionalmente a partir del uso de modelos.

Un modelo es una abstracción y una simplificación de algún aspecto de la realidad. Es una forma de caracterizar un sistema o parte de un sistema para su estudio y análisis. El modelo puede estar constituido por uno o varios gráficos, una o más tablas, una o múltiples ecuaciones. Por otro lado, un modelo matemático utiliza lenguaje matemático (conciso y menos ambiguo) para representar la realidad de manera simplificada.

Un *modelo de crecimiento y rendimiento* es una abstracción de la dinámica natural de un rodal, y puede abarcar el crecimiento y/o rendimiento, la mortalidad, y otros cambios en la composición y estructura del rodal. El uso común del término "modelo de crecimiento" generalmente se refiere a un sistema de ecuaciones que puede predecir el crecimiento y rendimiento de un rodal bajo una amplia variedad de condiciones. Así, un modelo de crecimiento puede comprender una serie de ecuaciones matemáticas, los valores numéricos de esas ecuaciones, la lógica necesaria para vincular estas ecuaciones de una manera significativa, y la programación necesaria para implementar el modelo en una computadora.

Si bien los modelos son una representación simplificada de la realidad, su diseño incluye elementos y relaciones suficientes para representar el crecimiento de árboles. Además las técnicas de simulación permiten representar condiciones de manejo específicas para cada situación, en lugar de considerar condiciones modales. Esto analizar los resultados de distintas prácticas silvícolas. En este sentido los modelos de producción y crecimiento constituyen una herramienta importante para el manejo forestal sustentable, brindando flexibilidad a la predicción en función del objetivo de producción, las especies, el manejo silvícola y las condiciones ambientales donde se hallan implantadas las forestaciones.

Los modelos de crecimiento pueden ayudar a los investigadores y los gestores forestales de diversas maneras. Algunos usos importantes de los modelos incluyen la capacidad para predecir rendimientos futuros y explorar distintas opciones silviculturales. Los modelos proporcionan una manera eficiente para preparar estimaciones de rendimientos futuros, pero un papel más importante puede ser su capacidad para explorar opciones de gestión y alternativas silvícolas. Por ejemplo, conocer el efecto a largo plazo sobre los rodales y en futuras cosechas de una decisión silvicultural en particular, como por ejemplo el cambio en el turno de corta. Con un modelo de crecimiento se pueden examinar los posibles

resultados de distintas alternativas silviculturales y tomar una decisión objetiva. El proceso de desarrollo de un modelo de crecimiento también puede ofrecer nuevas e interesantes ideas sobre dinámica del rodal.

En la literatura existe una extensa experiencia sobre modelos de crecimiento de masas forestales coetáneas puras, sobre todo de plantaciones. Sin embargo, estos ecosistemas son en muchos aspectos relativamente simples, y muchos de estos métodos de modelización no se aplican en las masas forestales más complejas con árboles de diferentes edades o muchas especies. Los bosques húmedos tropicales plantean un problema especial, ya que puede haber cientos de especies y una gran diversidad de árboles de tamaños y patrones de crecimiento distintos. Esta complejidad significa que muchas de las técnicas ideales para el modelado de las plantaciones no son adecuadas para el modelado de los bosques mixtos, especialmente en los trópicos.

Gran parte de la evolución en el desarrollo de los modelos está vinculado al desarrollo de la computación. Antes del advenimiento de la computación los investigadores tuvieron serias limitaciones para la formulación de modelos complejos, por lo que tuvieron que simplificarlos al máximo. Las computadoras se han convertido en herramientas indispensables en el proceso de ajuste de los modelos, pero no son esenciales para el proceso de modelado. El proceso de modelado se centra principalmente en lograr una buena representación del sistema, y la computadora no es más que una manera conveniente para realizarlo.

### **Clasificación de los modelos: diferentes enfoques para el modelado del crecimiento**

Los modelos de crecimiento y rendimiento disponibles reflejan diferentes prácticas silvícolas, filosofías de modelaje y niveles de complejidad matemática. Existe una gran cantidad de modelos de crecimiento, por lo tanto, la clasificación de los modelos puede basarse en una variedad de características. Debido a que es imposible examinar la metodología utilizada en cada uno, es necesario identificar algunas características y así poder clasificar a los modelos de acuerdo a algunos rasgos en común. Una forma de clasificar a los modelos es de acuerdo al enfoque que se utiliza en su desarrollo. De esta manera los modelos se clasifican en *modelos de procesos* y *modelos empíricos*.

Los *modelos de proceso* intentan modelar los procesos del crecimiento teniendo como entrada la luz, la temperatura y los niveles de nutrientes en el suelo, y estimando a partir de dichos factores la fotosíntesis, la respiración y la asignación de los fotosintatos a las raíces, tallos y hojas. Los *modelos de procesos* son representaciones matemáticas de los sistemas biológicos que incorporan nuestro conocimiento sobre los mecanismos fisiológicos y ecológicos en los algoritmos de predicción. Es decir, se intenta describir matemáticamente los procesos fisiológicos y ecológicos que se ven afectados por los cambios en los recursos (Johnsen et al., 2001). Inicialmente estos modelos fueron diseñados y utilizados para fines de investigación, pero se están desarrollando para su uso en el manejo forestal. Los modelos de procesos diseñados para la investigación suelen requerir datos complejos y difíciles de obtener, mientras que los modelos diseñados para la gestión deben enfocarse en

utilizar datos más simples y fáciles de obtener y proporcionar predicciones útiles para los gestores forestales (Johnsen et al., 2001).

Por otro lado, los *modelos empíricos* se basan en descripciones estadísticas de los árboles y rodales derivadas de datos recogidos en un gran número de parcelas permanentes de muestreo o temporales destinadas a representar las zonas forestales de interés. Los procedimientos estadísticos utilizados para generar los modelos por lo general no requieren el conocimiento de los procesos que subyacen al crecimiento de los árboles y los rodales. Estos modelos pueden proporcionar información muy precisa sobre las áreas muestreadas si las mediciones de campo son lo suficientemente buenas. También tienden a ser muy robustos debido a que los resultados están limitados por datos verdaderos de campo dentro del rango observado. La mayoría de los *modelos empíricos* tienen una complejidad relativamente baja, lo que hace más accesibles su uso por parte de los gerentes y tomadores de decisiones durante la gestión forestal.

Los modelos empíricos han evolucionado desde las primeras tablas de rendimiento (Siglo XVIII) a los modelos de árbol individual dependientes de la distancia (modelos matemáticos más complejos).

Los *modelos empíricos* se pueden clasificar, de acuerdo al nivel de detalle que ofrecen, en tres grupos: *modelo de rodal*, *modelo de clases de tamaño* y *modelo de árbol individual*. Si bien esta clasificación de los modelos resulta lo suficientemente amplia y sencilla, en la práctica, los modelos forman un continuo de un extremo a otro y algunos casos no encajan en ninguna de las clases mencionadas.

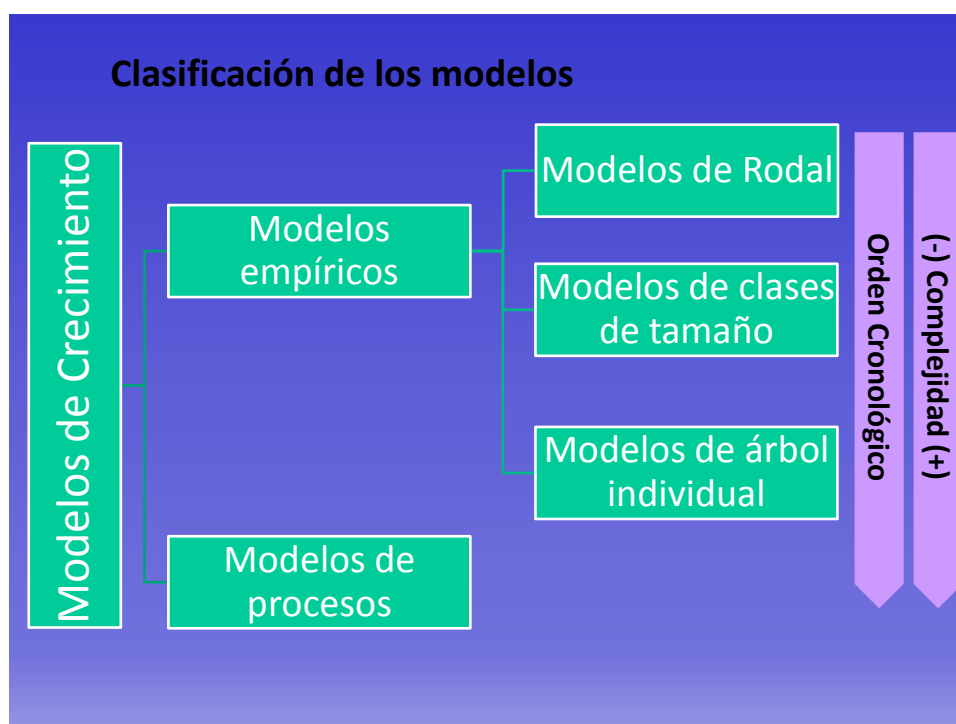


Figura 1.- Clasificación general de los modelos de crecimiento y rendimiento forestales.

Los *modelos de rodal* son en general simples y robustos. Los parámetros poblacionales como densidad (número de árboles por unidad de área), área basal y volumen en pie se utilizan para predecir el crecimiento o rendimiento del rodal. Estos modelos se derivan de relaciones estocásticas entre las variables dependientes (altura, área basal, número de árboles, volumen, etc.) y un conjunto de variables independientes que caracterizan al desarrollo de un rodal (edad, índice de sitio, número de árboles, etc.). No se determinan detalles de árboles individuales en el rodal. La distribución de tamaño puede o no derivarse de distribuciones existentes o predichas.

Los *modelos de clase de tamaño* ofrecen un compromiso entre los *modelos de rodal* y los *modelos de árbol individual*. Emplean a las clases de tamaño de árboles como la unidad básica para la modelización. Los *modelos de clase de tamaño* proporcionan información sobre la estructura del rodal (ej. estructura horizontal). Existen varias técnicas para modelar la estructura del rodal, pero una de la más ampliamente utilizada es el método de tabla de proyección de rodal, que esencialmente produce un histograma de diámetros de fuste. Otra técnica muy difundida es el método de distribución diamétrica. Cualquier método de distribución diamétrica estima la distribución diamétrica del rodal a partir parámetros del rodal (por ejemplo: edad, índice de sitio, densidad, la altura media de los dominantes y codominantes). Este método busca predecir los valores para los parámetros de alguna distribución de probabilidad, como por ejemplo la distribución de Weibull. Luego, el rendimiento del rodal es obtenido por sumatoria del rendimientos de cada clase. Algunos autores clasifican a los modelos de clases de tamaño como modelos de rodal debido a que las variables predictoras del modelo son parámetros del rodal (edad, índice de sitio, número de árboles por hectárea, etc.).

Los *modelos de árbol individual* utilizan al árbol individual, en lugar del rodal, como la unidad básica para la modelización. La diferencia básica entre los *modelos de rodal* y los *modelos de árbol individual* es que las variables de predicción de los primeros son parámetros del rodal, mientras que al menos algunas de las variables predictoras en cualquier modelo *de árbol individual* son parámetros de los árboles individuales. La información mínima requerida es una lista que especifica el tamaño de cada árbol en el rodal. Algunos modelos también requieren la posición espacial de los árboles, o la altura y clase de copa. Los modelos de árbol individual pueden ser muy complejos, modelando las ramas y las características internas del fuste. Los *modelos de árbol individual* proporcionan la información más detallada.

Los modelos de árbol individual se pueden clasificar en: *independientes de la distancia* y *dependientes de la distancia*. Los primeros requieren al menos algunos datos de árboles individuales (diámetro, altura, razón de copa, diámetro de copa, etc.), pero que no requieren ninguna información relativa a la distribución espacial de los árboles que intervienen en la proyección del crecimiento. Por otro lado, los modelos dependientes de la distancia, también requieren datos de árboles individuales, pero estos datos deben incluir información sobre las distancias entre árboles (un par de coordenadas X-Y que especifique la ubicación del árbol dentro del área que constituye la parcela de proyección del crecimiento) o algún índice de competencia espacial. Los modelos dependientes de la distancia se basan en el supuesto que el crecimiento de los árboles se puede predecir con mayor precisión si se conocen el tamaño y ubicación de los competidores vecinos.

Es útil distinguir entre los modelos estáticos y dinámicos. Los *modelos estáticos* predicen directamente el valor final de una variable (volumen, diámetro medio, etc.) en un momento determinado en el tiempo. Las tablas de rendimiento de rodal y los diagramas de manejo de la densidad de son ejemplos de modelos estáticos de rodal. Para la construcción de modelos estáticos sólo son necesarias mediciones en un solo punto en el tiempo en cada parcela. Por otro lado, los *modelos dinámicos* predicen tasas de cambio bajo diferentes regímenes de manejo y condiciones de rodal. Para generar este tipo de modelos son necesarios al menos dos mediciones sobre la misma parcela experimental.

También se puede clasificar a los modelos en *modelos para la comprensión* y *modelos para la predicción*. Los *modelos para la comprensión* (por ejemplo, los modelos de proceso) son útiles para comprender y enlazar los conocimientos aislados previamente existentes y pueden ayudar a identificar los vacíos de conocimiento donde es necesario un mayor desarrollo. Los beneficios provienen de los conocimientos adquiridos durante el desarrollo y exploración del modelo, y los usos futuros (si los hay), son menos importantes. Por el contrario, los *modelos de predicción* (por ejemplo, los modelos empíricos) pueden sacrificar los detalles específicos de los procesos de crecimiento para lograr una mayor eficiencia y precisión en el suministro de información para el manejo de los rodales. El realismo no es necesariamente una virtud en estos modelos, y puede ser mejor resumir sólo aquellos aspectos que son más relevantes en cada caso.

### **Modelos empíricos vs. modelos de procesos**

Los *modelos empíricos* basados en datos históricos, sean de nivel agregado o de árboles individuales, tienen un alto grado de precisión en la estimación del crecimiento y rendimiento forestal. Sin embargo, debido a que están basados y ajustados en base a registros de crecimiento pasado, carecen de la flexibilidad necesaria para tener en cuenta cambios en las condiciones ambientales o en el manejo forestal sobre el desarrollo de los rodales para los cuales no existan datos históricos.

Los modelos basados en procesos representan una alternativa a esta limitación de los modelos empíricos. Los *modelos de procesos* pueden proporcionar proyecciones más sólidas bajo condiciones ambientales y/o de manejo variables. Sin embargo, hasta el momento estos modelos han contribuido poco al manejo forestal práctico. Esto se debe, en parte debido a su complejidad, y en parte porque los resultados de las simulaciones a menudo no son de interés para los administradores forestales, interesados en un producto económico final.

En parte, la solución a este problema radica en la búsqueda de un compromiso entre la simplificación de los detalles fisiológicos que abarquen las características esenciales y respuestas del sistema y la vinculación de las simulaciones de los modelos de proceso con la información obtenida a partir del análisis estadístico de datos de inventarios. Un modelo de proceso práctico no debe requerir información muy detallada, los datos de entrada y valores de los parámetros deben ser de fácil acceso y obtención para personas que pueden no tener el tiempo ni la experiencia para determinar valores de la literatura y mediciones. Además,

las salidas deben estar en consonancia con las necesidades del usuario. Los modelos de procesos diseñados para la investigación suelen requerir datos complejos y difíciles de obtener, mientras que los modelos diseñados para la gestión deben enfocarse en utilizar datos más simples y fáciles de obtener y proporcionar predicciones útiles para los gestores forestales (Johnsen et al., 2001; Bernier et al., 2003). Es esencial que los modelos de procesos sean calibrados o sus predicciones comparadas con mediciones de inventarios forestales.

El modelo "3-PG" (**Physiological Principles Predicting Growth**) (Landsberg y Waring, 1997) es un modelo que se desarrolló en un intento deliberado de reducir la brecha entre los modelos empíricos y los modelos de procesos. El modelo 3-PG es un modelo de procesos relativamente simple que requiere de pocos parámetros y los datos como valores de entrada.

### **Elección de un modelo**

En todos los casos, el tipo de modelo más adecuado varía según el uso previsto, las características de los rodales, los recursos disponibles y la duración de la proyección (Vanclay, 1994). Cabe recordar que cada modelo es una simplificación de la realidad y va a ser erróneo en algún sentido. Los usuarios deben tener en cuenta que todos los modelos tienen errores, solamente que algunos pueden ser más útiles que otros.

El modelo adecuado es aquél que es más útil para la aplicación deseada y la elección debe basarse en los usos futuros, en los recursos, la experiencia disponible y los datos disponibles. Es el uso final del modelo lo que finalmente determina el mejor enfoque para modelar los rodales forestales. Cada aplicación puede requerir un enfoque diferente de modelo de crecimiento, ningún modelo puede servir a todas las necesidades, y cada demanda puede requerir diferentes cualidades de un modelo. Un modelo debe proporcionar información que sea suficientemente precisa y detallada para adaptarse a la finalidad prevista del modelo.

Tanto los modelos simples como los sofisticados tienen su lugar. Lo importante es lo que se desea hacer con el modelo. Un modelo sofisticado no tiene ningún beneficio si no se utiliza, mientras que un modelo simple puede ser de gran utilidad si conduce a una mejor gestión de los bosques. Los modelos que son innecesariamente complicados puede incurrir en algunas desventajas como: mayores costos computacionales, pérdida de la precisión de las estimaciones, y la dificultad en la comprensión y la evaluación de la utilidad del modelo. Así, un modelo debe ser objetivo, insesgado y preciso, estar bien documentado y disponible. Los usuarios deben entender cómo fue desarrollado el modelo, y apreciar sus fortalezas y debilidades.

### **Bibliografía**

Bernier, P., Landsberg, J., Raulier, F., Almeida, A., Coops, N., Dye, P., Espinosa, M., Waring, R. & Whitehead, D. (2003). Using process-based models to estimate forest productivity for management purposes. En XII World Forestry Congress, FAO, Quebec City, Canada.

Clutter, J. L., Forston, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). Timber management: a quantitative approach (p. 333). New York: John Wiley & Sons.

Johnsen, K., Samuelson, L., Teskey, R., McNulty, S., & Fox, T. (2001). Process models as tools in forestry research and management. *Forest Science*, 47(1): 2–8.

Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95(3): 209–228.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura forestal* (p. 561). San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.

Vanclay, J. K. (1994). *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests* (p. 312). Wallingford: CAB International.