

EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN PRECOCES DEL CRECIMIENTO DE RODALES DE *Pinus taeda* L. CON MATRICES DE TRANSICIÓN

Precocious growth evaluation and simulation with transition matrixes for Pinus taeda stands

C. R. Sanquetta ¹, J. E. Arce ¹, F. dos Santos Gomes ¹, E. Coutinho da Cruz ²

Recibido en marzo de 1997; aceptado en febrero de 1998

RESUMEN

Es evaluado y simulado el crecimiento de rodales jóvenes, coetáneos, monoespecíficos y homogéneos de *Pinus taeda* L. utilizando la técnica de simulación Matrices de Transición. Los datos utilizados provienen de mediciones realizadas en árboles individuales en 1993 y 1996 (6^a y 9^a años) en un ensayo de espacia-mientos de *Pinus taeda* L., instalado en el municipio de Jaguariaíva - PR, en la Fazenda Lageado, propiedad de la empresa "Pisa Florestal". La construcción de las matrices de transición a partir de observaciones diamétricas obtenidas de rodales de *Pinus taeda* en dos oportunidades, separadas entre sí por un intervalo de tiempo dado, es factible y permite obtener simulaciones coherentes para un período de tiempo igual al considerado. La simulación para intervalos de tiempo mayores que el período utilizado en la construcción de las matrices de transición no es recomendable, por tratarse de rodales jóvenes y no estar disponible, por lo tanto, información del ciclo completo de la dinámica del bosque.

Palabras clave: crecimiento, simulación, matrices de transición, *Pinus taeda*, distribuciones diamétricas.

ABSTRACT

The growth of young, even-aged, monospecific and homogeneous stands of *Pinus Taeda* L. are evaluated and simulated with the Transition Matrix simulation technique. The used data was obtained from measurements over individual trees in 1993 and 1996 (6th and 9th years) in an spacing test of *Pinus taeda* L. at farm Fazenda Lageado in Jaguariaiva - PR, from the Pisa Florestal company. The transition matrixes construction from two diameter observations separated by a time interval are feasible and conduce to coherent simulations for a similar time interval that the used for the transition matrixes construction. Simulations for longer time intervals that the used for the transition matrixes construction are not recommended because the sampled stands are young and it is not disposable information about the complete dynamic cycle of the forest.

Key words: growth, simulation, transition matrixes, *Pinus taeda*, diameter distributions.

¹ Universidad Federal del Paraná (UFPR), Rua Bom Jesus 650 – Juveve 80.035-010 Curitiba - PR, Brasil.

² Universidad Federal del Amazonas. Brasil.

1. INTRODUCCIÓN

Un manejo forestal efectivo implica la aplicación de un sistema de tratamientos para el control de la masa forestal, de tal manera que el incremento en el valor económico y/o social del bosque sea más rápido que los intereses acumulados de los costos de los tratamientos (Alder, 1980). Al mismo tiempo, todas las operaciones de exploración disminuirán la masa futura en mayor o menor grado. Una tasa de exploración muy alta traerá como consecuencia final la liquidación del recurso forestal; una tasa muy baja puede privar a la comunidad de recursos inmediatos y reducir el potencial de crecimiento futuro del bosque (Alder, 1980). Un modelo de predicción del rendimiento debe ser capaz de evaluar todos los factores relacionados con el manejo forestal, si es que se quiere utilizarlo plenamente en la toma de decisiones de la empresa forestal (Clutter, et al., 1983).

El manejo silvícola dentro de un rodal puede ser realizado árbol por árbol, o por agrupamientos, pero el mayor interés de la ingeniería forestal se centra en el efecto de los tratamientos sobre el volumen, el valor o la estructura, de la totalidad del rodal (Daniel, et al., 1982).

El crecimiento de los rodales puros coetáneos se ve afectado por el estado de desarrollo del bosque, la calidad de sitio, la especie, la densidad - expresada en área basal y en número de árboles por unidad de superficie -, los tratamientos silviculturales, y las unidades en las que es expresado el crecimiento. La densidad del rodal es el segundo factor en importancia, después de la calidad de sitio, para la determinación de la productividad de un sitio forestal (Daniel, et al., 1982), para una determinada calidad del material genético utilizado. La densidad del rodal es el principal factor de producción que el silvicultor puede manejar durante el desarrollo del bosque.

La estimación del crecimiento es una etapa esencial en la ordenación forestal. Cualquier planificación implica la predicción del crecimiento (Spurr, 1952). Una correcta estimación de la productividad forestal de un sitio, expresada en m^3/ha , proporciona una herramienta útil y necesaria de planeamiento y administración de la empresa forestal.

Solamente podrán ser tomadas decisiones racionales a respecto de la intensidad y épocas de raleos y de la cosecha final, si la respuesta de los bosques a estas operaciones puede ser cuantificada. Los estudios de crecimiento y rendimiento son los medios utilizados para alcanzar este fin (Alder, 1980).

El estudio y la modelización del crecimiento y de la producción forestal es de fundamental importancia para la implementación de técnicas de manejo y planeamiento forestal. El proceso de decisión en el manejo forestal requiere del conocimiento de todas las variables envueltas en el proceso productivo, como también de la evolución de la producción del rodal. Los modelos de simulación son actualmente imprescindibles para el correcto desarrollo de técnicas que buscan obtener la máxima productividad del bosque y la máxima rentabilidad del emprendimiento.

Alder (1980), Clutter et al (1983) y Davis y Johnson (1987) clasificaron a los modelos de crecimiento y producción en tres tipos:

- Modelos globales de rodal, que permiten obtener una estimación general de la producción por unidad de área;
- Modelos por clases diamétricas, que posibilitan la prognosis del número de árboles por clase diamétrica. La altura, el volumen y otras características del rodal pueden ser asociadas a cada una de esas clases; y,
- Modelos para árboles individuales, que consideran características de árboles individuales para la prognosis del crecimiento y producción del rodal.

Los modelos por clase diamétrica utilizan normalmente funciones de densidad de probabilidades para la obtención de las frecuencias de los árboles en cada clase diamétrica. Las variables independientes más comunes para las prognosis son el número de árboles por hectárea, la edad y la altura dominante del rodal.

Según Sanquetta (1996), tres modelos no espaciales expresan el desarrollo del rodal por medio de la descripción de la evolución de las distribuciones diamétricas o de otra variable en clases, y son conocidos como funciones probabilísticas, matrices de transición y procesos de difusión.

La matriz de transición es un proceso estocástico utilizado para estudiar fenómenos que pasan a partir de un estado inicial por una secuencia de estados, donde la transición de un determinado estado ocurre según una cierta probabilidad. Los puntos más importantes en el montaje de una Cadena de Markov son la definición de estados del sistema y la construcción de la matriz de transición probabilística (Hoyos, 1980). De acuerdo con Enright y Ogden (1979), el único requisito para la utilización del modelo matricial es que la población pueda ser dividida en estados o compartimentos, y que exista la probabilidad de movimiento de un estado para otro en el tiempo.

De acuerdo con Sanquetta (1996), en las matrices de transición se utiliza el criterio de separar árboles de una cierta clase diamétrica que avanzan para una, dos o más clases consecutivas de aquellos que permanecen en la misma clase o mueren durante un intervalo de tiempo dado. Esta dinámica de clases determina las probabilidades que constituyen los elementos de la matriz de transición.

Muchos ejemplos de modelos con matrices de transición han sido utilizados para simular la dinámica de poblaciones forestales. En la gran mayoría de los casos, la población es dividida en clases diamétricas y la proyección de la frecuencia en estas clases se basa en el comportamiento observado en un determinado período de tiempo.

La proyección del crecimiento diamétrico por medio de matrices de transición ya fue estudiada por diversos investigadores. Entre ellos pueden ser citados: Bruner y Moser Jr. (1973) en un rodal de frondosas mixtas en Wisconsin-EUA; Enright y Ogden (1979) en poblaciones de *Araucaria* sp. del bosque tropical húmedo de Papua-Nueva Guinea y de *Nothofagus fusca* de los bosques templados de Nova Zelandia; Robert y Hruska (1986) en rodales de *Pinus* sp. en los Estados Unidos; Buongiorno y Michie (1980) en rodales de *Acer sacharum* en Wisconsin y Michigan en los EUA; y Mendoza y Setyarso (1986) como instrumento auxiliar en la determinación del ciclo de corte en bosques de Indonesia.

Clutter y Bennett (*op. cit.* Bruner y Moser Jr., 1973) utilizaron, en rodales coetáneos, la edad para computar cambios en las distribuciones diamétricas con el tiempo. La posibilidad de describir la distribución diamétrica en diferentes edades a partir de la distribución probabilística exponencial negativa fue sugerida por Leak (1965).

Lowell y Mitchell (1987) señalaron tres importantes limitaciones de la Cadena de Markov: 1) es asumida una única calidad de sitio mientras que la dinámica de la población varía con el sitio; 2) cualquier árbol es tratado de la misma manera independientemente de las características particulares del rodal; 3) la estructura del rodal es ignorada al ser considerada la misma dinámica de la población, tanto para rodales coetáneos como disetáneos, puros o con una composición variada de especies.

Un gran inconveniente de la utilización de la Cadena de Markov es la inflexibilidad del modelo, ya que no permite hacer proyecciones para intervalos de tiempo que no sean múltiplos del intervalo de medición. En este caso las estrategias de manejo quedan también condicionadas a los años múltiplos del intervalo de medición (Harrison y Michie, 1985). Estos autores desarrollaron un procedimiento para salvar esta restricción, por medio de la factorización de la matriz de transición para períodos de un año. Para contornar la dificultad extrema de la obtención de datos y de un número incontable de tablas, considerando una Cadena de Markov para cada sitio y estructura, los mismos autores propusieron como alternativa el uso de regresiones logísticas con variables de criterio (para modelar el crecimiento y la mortalidad) y, además, otras variables auxiliares que describan el rodal en cuestión (diámetro medio, área basal, altura dominante, stock de crecimiento, etc.).

El objetivo principal del presente estudio es evaluar y simular el crecimiento de rodales jóvenes, coetáneos, monoespecíficos y homogéneos de *Pinus taeda* utilizando la técnica de simulación Matrices de Transición.

2. MATERIALES

Los datos utilizados provienen de un ensayo de espaciamientos de *Pinus taeda* L., instalado en el municipio de Jaguariáva - PR, Fazenda Lageado, de propiedad de la empresa "Pisa Florestal", Proyecto J-2, cuadro 11. La plantación fue realizada entre los días 28 de octubre y 9 de noviembre de 1987, con plantines obtenidos a partir de semillas procedentes de Telêmaco Borba - PR, de la empresa "Klabin Florestal".

El área ocupada por el ensayo consta de seis bloques instalados de manera continua en un total de 2,97 ha (incluyendo la bordura), con un área útil de 2,59 ha. El lugar de implantación del ensayo poseía reforestación con *Pinus taeda* de 16 años de edad. A fines de 1986 fue realizada una tala rasa en el proyecto. La limpieza del material resultante del aprovechamiento fue realizada mediante una quema controlada, quedando el área, según los criterios de preparación del terreno de la empresa, apta para la nueva plantación. La herramienta principal utilizada para la plantación fue el azadón, el cual propició la abertura de hoyos con dimensiones medias de 20 cm de ancho por 15-20 cm de profundidad en formato de embudo. No fue realizado ningún tipo de abonado. Conforme la necesidad y dentro de los patrones adoptados por la empresa, fueron realizadas limpiezas en el ensayo.

El ensayo evalúa cinco espaciamientos, repetidos en seis bloques continuos. Cada parcela posee doble bordura y son medidos solamente los árboles constantes de su área útil. Además, el ensayo posee una doble bordura externa, buscando proporcionar el máximo de confiabilidad a las inferencias. Los tratamientos del Diseño en Bloques Completos al Azar son los siguientes:

| Tratamiento | Espaciamiento (m) | Árboles/ha | Área de la Parcela (m ²) | | Plantas útiles |
|-------------|-------------------|------------|--------------------------------------|------|----------------|
| | | | total | útil | |
| 1 | 2,5 x 1,2 | 3333 | 630 | 234 | 78 |
| 2 | 2,5 x 2,0 | 2000 | 630 | 210 | 42 |
| 3 | 2,5 x 2,8 | 1428 | 810 | 315 | 45 |
| 4 | 2,5 x 3,6 | 1111 | 990 | 378 | 42 |
| 5 | 2,5 x 4,4 | 909 | 1260 | 440 | 40 |

Las mediciones de DAP y altura total fueron realizadas anualmente, entre los años 1991 y 1996. Los datos utilizados en el presente trabajo corresponden a mediciones de árboles individuales realizadas en 1993 y 1996 (6^o y 9^o años).

3. MÉTODOS

El primer análisis a ser realizado sobre los datos será testar la existencia de diferencias entre los 5 tratamientos que justifiquen el estudio separado del crecimiento de cada uno de ellos. Las diferencias serán analizadas por medio del test de comparación de medias (Tukey, $\alpha=0,05$), para los 5 tratamientos y los 6 períodos de observación (1991 a 1996).

La matriz de transición es un método de simulación que considera las frecuencias diamétricas en el año de inicio de la simulación (N_t) como un vector, que multiplicado por una matriz de probabilidades de transición entre clases diamétricas (Tp) permite obtener las frecuencias diamétricas del año final (N_{t+1}). El ingreso es considerado también como un vector (R_t), que es adicionado al producto vector-matriz descripto. La mortalidad puede ser considerada

de dos maneras: como un vector de sustracción (Mt), o incluida en la matriz Tp en las últimas línea y columna.

En álgebra de matrices, el proceso de simulación para 1 período ($t \rightarrow t+1$), con la mortalidad incluida en la matriz de transición, puede ser resumido como sigue:

$$\underbrace{N_{t+1}}_{(n+1) \times 1} = \left(\underbrace{N_t'}_{t \times (n+1)} \cdot \underbrace{Tp}_{(n+1) \times (n+1)} \right) + \underbrace{R_t}_{(n+1) \times 1}$$

y para simulaciones abarcando p períodos sin considerar el ingreso, que es el caso de los bosques plantados de *Pinus* sp., el proceso de simulación queda:

$$\underbrace{N_{t+1}}_{(n+1) \times 1} = \left[\underbrace{N_t'}_{1 \times (n+1)} \cdot \underbrace{(Tp)^p}_{(n+1) \times (n+1)} \right]$$

donde $(Tp)^p$ es la matriz potencia de Tp , lo que en álgebra de matrices indica el producto de la matriz Tp por si misma p veces ($Tp^3 = Tp \times Tp \times Tp$). Para que el producto sea factible, la matriz Tp debe ser cuadrada ($N^{\text{º}}$ de líneas = $N^{\text{º}}$ de columnas).

La matriz de transición (Tp) esencialmente es una matriz de probabilidades, cuyos elementos están descriptos a seguir:

$$Tp = \begin{bmatrix} pf_1 & pa_1 & pb_1 & pc_1 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & pm_1 \\ & pf_2 & pa_2 & pb_2 & pc_2 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & pm_2 \\ & & pf_3 & pa_3 & pb_3 & pc_3 & \cdots & \cdots & \cdots & pm_3 \\ & & & \vdots & \vdots & & & & & \vdots \\ & & & & pf_i & pa_i & pb_i & pc_i & & pm_i \\ & & & & & & & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & & & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & & & & pf_{n-1} & pa_{n-1} & pm_{n-1} \\ & & & & & & & & & pf_n & pm_n \\ & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

donde:

pf_i = probabilidad de que los árboles de la clase i permanezcan en la clase i durante ($t \rightarrow t+1$);

pa_i = probabilidad de que los árboles de la clase i avancen para la clase $i+1$ ($t \rightarrow t+1$);

pb_i = probabilidad de que los árboles de la clase i avancen para la clase $i+2$ ($t \rightarrow t+1$);

pc_i = probabilidad de que los árboles de la clase i avancen para la clase $i+3$ ($t \rightarrow t+1$);

pm_i = probabilidad de que los árboles de la clase i se mueran durante el período ($t \rightarrow t+1$);

i = número de la clase diamétrica, variando desde 1 hasta n (última clase).

Los vectores de frecuencias observadas (N_t) y de ingresos (R_t) representan unidades físicas (árboles) por clases diamétricas presentes en el inicio de la simulación e ingresadas durante el período $t+1$, respectivamente. Por tratarse de bosques plantados el ingreso puede ser despreciado y el vector R_t considerado como un vector nulo. El vector N_t es representado como sigue:

$$N_t' = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad \cdots \quad N_{n-1} \quad N_n \quad N_m]$$

donde:

N_i = frecuencia diamétrica de la clase i $i=1,2, \dots, n-1, n$;

N_m = número de árboles muertos en el instante t .

Con los datos obtenidos en los años 1993 y 1996 será determinado, para cada tratamiento y clase diamétrica, el número de árboles que permanecieron, murieron o avanzaron para la(s) clase(s) siguiente(s), durante el período considerado. Con estos valores podrán ser calculadas las probabilidades de permanencia en la clase, transición entre clases y mortalidad de los árboles de cada tratamiento y clase diamétrica, necesarias para la construcción de las matrices de transición.

La mortalidad será incluida en la matriz de transición en las últimas línea y columna. Por tratarse de una reforestación medida a partir del 4º año con la reposición ya realizada, el ingreso será considerado inexistente.

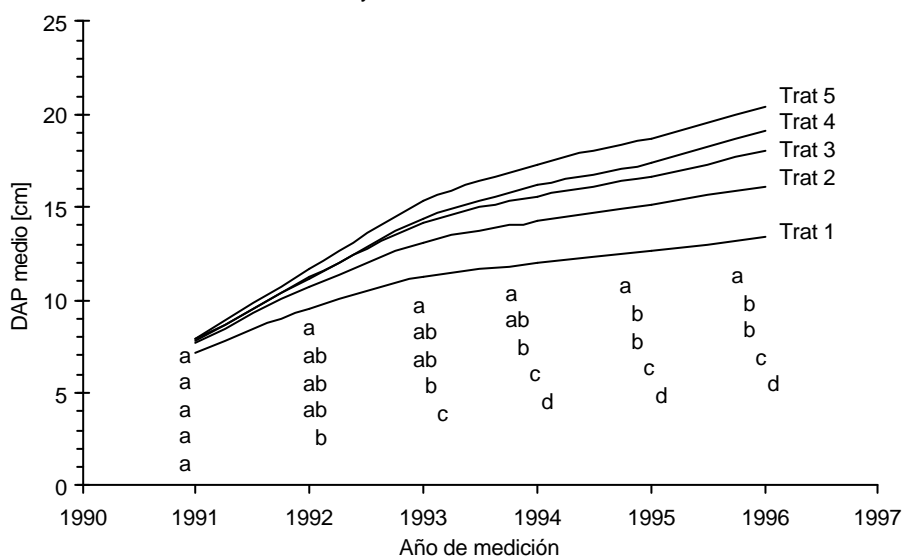
Serán obtenidas matrices para clases diamétricas de diferentes amplitudes, considerando las diferentes densidades de los tratamientos. La selección de la amplitud de clase para cada tratamiento dependerá de la apariencia de la matriz de transición resultante y, principalmente, del resultado de las simulaciones realizadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El test de comparación de medias de diámetros por tratamientos muestra que a partir del año 1992 comienzan a ser observadas diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) entre algunos tratamientos. Las diferencias se tornan más notables a lo largo del tiempo, hasta distinguir casi todos los tratamientos entre sí en el año 1996. La Figura 1 muestra los resultados obtenidos en el test de comparación de medias de diámetros.

Hasta el 9º año de edad (1996), los diámetros medios de los tratamientos 3 y 4 (1428 y 1111 pl/ha respectivamente) no presentaron diferencias significativas entre sí por medio del Test de Tukey al nivel de significancia de 5%. Todos los demás tratamientos están claramente diferenciados. Considerando que la evaluación del ensayo de espaciamientos al 9º año para *Pinus taeda* es relativamente precoz, es prudente, para los efectos de esta evaluación y simulación del crecimiento, discriminar los 5 tratamientos. Sería cometido un error mayor si los tratamientos 3 y 4 fuesen analizados de manera agrupada e, hipotéticamente con el tiempo, se diferenciasesen, de que si los tratamientos 3 y 4 fuesen analizados separadamente y, también en

Figura 1 Test de comparación de medias de diámetros por tratamiento
Test de Tukey al nivel de 5% - años 1991 a 1996



hipótesis, con el tiempo no se diferenciaren. La opción de agrupar los tratamientos en años subsecuentes siempre es factible.

También fueron comparadas las medias entre las 6 repeticiones (bloques), no presentando diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey al nivel de significancia de 5%.

Por haber sido evaluadas densidades desde 900 hasta 3333 plantas por hectárea, fue necesario testear amplitudes de clase diamétrica diferentes, de 2, 3 y 4 cm. Esta decisión se basó en el hecho de que, al utilizar clases diamétricas de pequeña amplitud con espaciamientos amplios (densidades bajas), las probabilidades de que los árboles permanezcan en la misma clase (pf_i) disminuyeron e incluso se anularon, mientras que las probabilidades de que los árboles avancen 2, 3, 4 y hasta 5 clases (pb_i , pc_i , pd_i , pe_i) aumentaron. Esto conduce a una matriz de transición impropia, de difícil interpretación, donde la diagonal principal posee elementos casi todos nulos ($pf_i=0$). Por otro lado, cuando fueron utilizadas amplitudes de clases diamétricas grandes con espaciamientos pequeños (densidades altas), las pf_i aumentaron mientras que las pa_i , pb_i y pc_i disminuyeron.

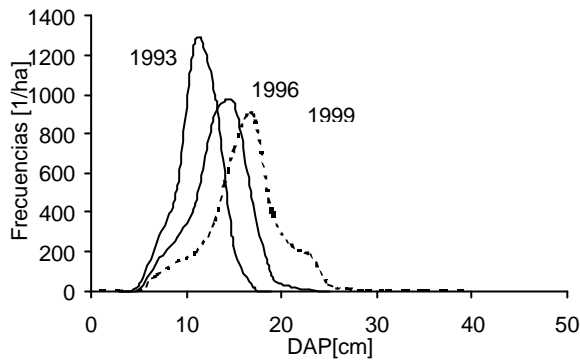
Fueron construidas matrices para un período de tres años, considerando los datos tomados en 1993 y 1996. Para la construcción de las matrices fue elaborada una rutina. La misma generó las cinco matrices de transición asociadas a los cinco tratamientos, además de los vectores de frecuencias diamétricas observadas para los años 1993, 1996 y simuladas para el año 1999. Para cada tratamiento fueron generadas matrices con amplitudes de clases diamétricas de 2, 3 y 4 cm, resultando en un total de 15 matrices de transición.

Las distribuciones diamétricas observadas en los años 1993 y 1996, y simuladas para el año 1999, son presentadas en las Figuras 2, 3, 4, 5 y 6, para los 5 tratamientos respectivamente. Las Figuras 2 a 6 muestran una armonía propia de la dinámica de un proceso biológico, donde las medidas de posición (media, moda) aumentan con el tiempo, junto con el aumento de las medidas de dispersión (Figuras 4 y 6). Las pequeñas discrepancias observadas en las Figuras 2, 3 y 5 podrían ser resultado del hecho de estar trabajando con muestras pequeñas, rodales jóvenes y no disponer de información del ciclo completo de la dinámica del bosque.

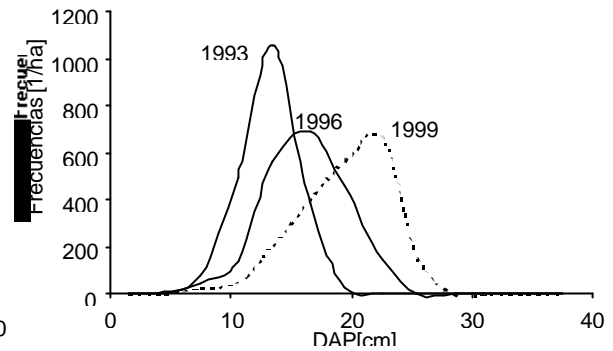
Las matrices seleccionadas para los 5 tratamientos son presentadas en las Tablas 1, 2, 3, 4 y 5. En las matrices pueden ser observadas algunas anomalías, una vez que las probabilidades pf_1 y pf_2 de la matriz de transición del tratamiento 1 tienen valor 1 (100%) (Tabla 1). Esto quiere decir que todos los árboles de estas clases diamétricas permanecerán en sus respectivas clases, sin existir transición para las clases siguientes. En la matriz de transición del tratamiento 2, el valor de la probabilidad de que los árboles de la clase diamétrica 2 se mueran (pm_2) tiene valor 1 (100%), diciendo que todos los árboles de esta clase diamétrica, morirán en el siguiente período de simulación de tres años (Tabla 2). La misma observación puede ser hecha para las pm_1 de las matrices de transición de los tratamientos 3 y 4 (Tablas 3 y 4).

Figura 2

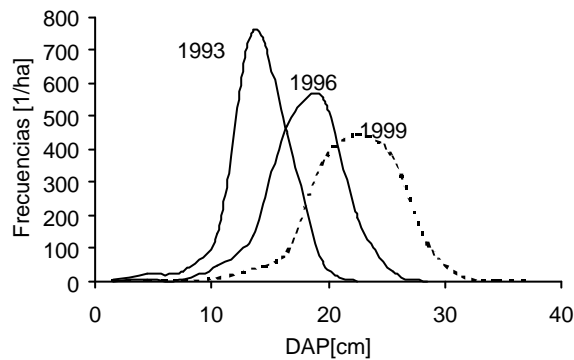
Tratamiento 1 - Clases de DAP de 2 cm.

**Figura 3**

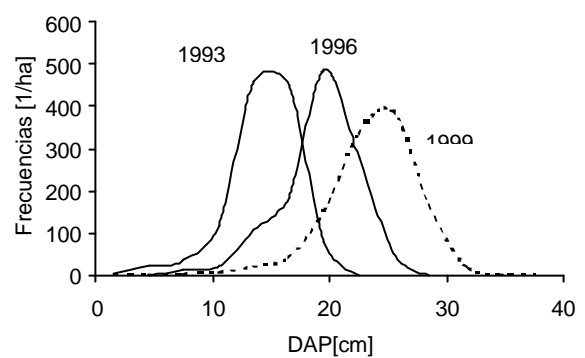
Tratamiento 2 - Clases de DAP de 3 cm.

**Figura 4**

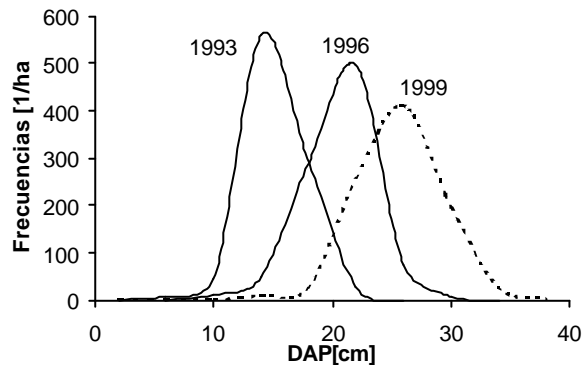
Tratamiento 3 - Clases de DAP de 3 cm.

**Figura 5**

Tratamiento 4 - Clases de DAP de 3 cm.

**Figura 6**

Tratamiento 5 - Clases de DAP de 4 cm.



Debido a la precocidad de la evaluación las probabilidades de transición disponibles a partir de los datos observados corresponden solamente a las primeras clases diamétricas. En el tratamiento 1, las probabilidades de transición fueron observadas hasta la clase diamétrica de 16-8 cm, en los tratamientos 2, 3 y 4, hasta la clase diamétrica de 18-21 cm, y en el tratamiento 5 hasta la clase diamétrica de 20-24 cm. En consecuencia fue necesario asumir que las últimas probabilidades de transición observadas para los 5 tratamientos se mantienen constantes para todas las clases subsecuentes. De esta manera se satisface el requisito de que la suma de las probabilidades de todas las líneas de la matriz de transición debe ser igual a 1: caso contrario se “perderían” árboles durante la simulación.

Las probabilidades de transición contenidas en las matrices (Tablas 1 a 5) fueron calculadas a partir de datos tomados en remediciones. En general, si las clases diamétricas fuesen bien determinadas (amplitud adecuada), las probabilidades de crecimiento pueden ser estimadas de manera consistente, pero para mayor seguridad es necesaria una evaluación continua de estas probabilidades a lo largo de todo el turno. El problema es más serio en el caso de las probabilidades de mortalidad, en virtud de ser éste un evento considerado raro y episódico en rodales comerciales. Por lo tanto, la estimación de las probabilidades de mortalidad es más problemática en rodales jóvenes, como los estudiados en esta investigación, considerando que los procesos de competencia aún no se han intensificado. Esto provoca estimaciones inconsistentes de las probabilidades de mortalidad, generando anomalías en las proyecciones, conforme fue discutido previamente en el texto. Esto representa una limitación al empleo del modelo matricial para proyecciones de largo plazo, principalmente cuando los datos provienen de rodales jóvenes.

Otro aspecto cuestionable de la simulación con matrices de transición es la suposición de que las probabilidades, una vez calculadas e insertadas en la matriz de transición, permanecerán constantes a lo largo de toda la vida del bosque. Este aspecto particular, entre otras desventajas del modelo, fue muy debatido entre los investigadores que trabajaron con matrices de transición, como por ejemplo Bruner y Moser (1973), Enright y Ogden (1979). Sin embargo, esta es una propiedad intrínseca de este tipo de modelo, y no es susceptible a mejoras. Alder (1980) detalla otras limitaciones inherentes a las matrices de transición.

Infelizmente existen pocos estudios sobre modelos de simulación para proyección de la producción forestal de rodales de *Pinus taeda* en el Brasil (Oliveira, 1995), que permitan comparar los resultados presentados en este artículo. A pesar de ello, las figuras generadas por simulación en el presente trabajo se han mostrado, en forma general, coherentes con la realidad de las evoluciones diamétricas comúnmente observadas en las plantaciones forestales de *Pinus*.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La construcción de matrices de transición a partir de observaciones diamétricas obtenidas de rodales jóvenes, coetáneos, monoespecíficos y homogéneos de *Pinus taeda* en dos oportunidades, separadas entre sí por un intervalo de tiempo dado, es factible y permite obtener simulaciones coherentes para un período igual al período de tiempo considerado. En el caso analizado las observaciones fueron realizadas en el 6^o y 9^o años (1993 y 1996), y permitieron simular las frecuencias diamétricas para el 12^o año (1999). Las simulaciones obtenidas muestran una armonía propia de la dinámica de un proceso biológico, donde las medidas de posición (media, moda) aumentan con el tiempo, junto con el aumento de las medidas de dispersión. La simulación para intervalos de tiempo mayores que el período de tiempo considerado para la construcción de las matrices de transición no es aconsejable, por tratarse de rodales jóvenes y no estar disponible, por lo tanto, información del ciclo completo de la dinámica del bosque.

Sería recomendable proseguir con las observaciones y mediciones del bosque hasta el final del ciclo, tanto para validar los resultados obtenidos con las simulaciones presentadas en este estudio como para calibrar y construir matrices de transición para períodos y edades diferentes. De esta manera la simulación de las distribuciones diamétricas se tornaría más dinámica utilizando sucesivamente varias matrices de transición hasta alcanzar el final del ciclo, conforme argumentado por Alder (1980). La calibración y retroalimentación constantes con datos provenientes de plantaciones comerciales es requisito fundamental de cualquier modelo de simulación forestal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer de modo muy especial a la empresa Pisa Florestal por haber facilitado gentilmente los datos utilizados en el presente trabajo, y a las personas Walquiria Pizzato, Jeferson Wendling, Zenóbio A. G. P. da Gama e Silva, Ruth Loch y Alexandra C. P. S. Bartosczek.

Nota del Comité editor: El autor también presento una rutina de trabajo programada para la obtención de matrices de transición, la cual no es publicada por razones de espacio.

REFERENCIAS

- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con especial referencia a los trópicos. Tomo II: Predicción del rendimiento. FAO 22/2. Italia. 118 p.
- Bruner, H. D. & J. W. Moser Jr. 1973. A Markov chain approach to the prediction of diameter distributions in uneven-aged forest stands. *Canadian Journal Forest Research* 3, 409-417.
- Buongiorno, J. & B. R. Michie 1980. A matrix model for uneven-aged forest management. *Forest Science* 26: 609-625. U.S.A.
- Clutter, J.L.; J. C. Fortson; L. V. Pienaar; G. H. Brister. & R. L. Bailey 1983. *Timber management: a quantitative approach*. Ed. John Wiley & sons. New York, USA
- Daniel, P.W.; U. E. Helms y F. S. Baker, 1982. *Principios de silvicultura*. Ed Mc Graw Hill. México. 492p.
- Davis, L.S. & K. N. Johnson 1987. *Forest management*. Mc Graw-Hill Book. USA. 790p.
- Enright, N. & J. Ogden 1979. Applications of transition matrix models in forest dynamics: Araucaria in Papua New Guinea and Nothofagus in New Zealand. *Australian Journal of Ecology*, N° 4, p. 3-23.
- Harrison, T. P. & B. R. Michie 1985. A generalized approach to the use of matrix growth models. *Forest Science*, v. 31, N° 4, p. 850-856.
- Hoyos, A. 1980. Processos estocásticos e previsão. In: 4^o Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística. Rio de Janeiro, 21 a 25 de julho de 1980.
- Leak, W. B. 1965. The J-shaped probability distribution. *Forest Science*, v. 11, N° 4, p. 405-409.
- Lowell, K. E. & R. J. Mitchell 1987. Modeling growth and mortality probabilistically using logistic regression. *USDA Forest Service NC GTR*, St. Paul, p. 708-715.
- Mendoza, G. A. & A. Setyarso 1986. A transition matrix forest growth model for evaluating alternative harvesting schemes in Indonesia. *Forest Ecology and Management.*, N° 15, p. 219-228.
- Oliveira, E. B. 1995. Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo. Tesis (Doctorado en Manejo Forestal), Universidad Federal del Paraná. 134p.
- Roberts, M. R. & A. J. Hruska 1986. Predicting diameter distributions: a test of the stationary Markov model. *Canadian Journal Forest Research*, N° 16, p. 130-135.
- Sanquetta, C. R. 1996. *Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal*. FUFEP - Série didática N° 8. Curitiba (PR), Brasil.
- Spurr, S. H. 1952. *Forest inventory*. The Ronald Press Company. New York, USA. 476p.

