



Epidometría Forestal

JOSÉ IMAÑA E.

OSVALDO ENCINAS B.

EPIDOMETRÍA FORESTAL

JOSÉ IMAÑA E.

OSVALDO ENCINAS B.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL



FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

Imaña E., José; Encinas B., Osvaldo

I31 Epidometría Forestal / José Imaña E. y Osvaldo Encinas B.

Brasília: Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal

Mérida: Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. 2008

72 p.; Il.; 15,5 x 22 cm

ISBN 978-85-87599-31-5

|. Mensura forestal. 2. Dasometría. 3. Edad y crecimiento de los árboles.

4. Ingeniería Forestal medición. I. Título

CDU – 634-0-5

Epidometría Forestal

Copyright © 2008

José Imaña E. y Osvaldo Encinas B.

1^{ra} edición

ISBN 978-85-87599-31-5

Reservados todos los derechos.

El contenido de esta obra puede ser reproducida siempre que sea citada correspondientemente.

Maquetación y diseño:

Edikapas C.A.



RED
LATINOAMERICANA
DE ENSEÑANZA
FORESTAL



Brasília, Brasil.

Mérida, Venezuela

Agosto de 2008

Introducción – 7

1 Edad – 9

2 Estimación de la edad – 13

2.1 Por observación – 13

2.2 Conteo de los verticilos – 14

2.3 Conteo de los anillos de crecimiento – 16

2.3.1 Barreno de Pressler o barreno de incremento – 21

2.3.2 Ventanas en el árbol en pie – 22

2.4 Estimaciones de la edad mediante fórmulas matemáticas – 22

2.5 Análisis del tronco – 24

2.5.1 Análisis parcial del tronco (árbol en pie) – 27

2.5.2 Análisis completo del tronco (árbol abatido) – 28

3 Estimaciones de la edad de árboles tropicales – 33

3.1 Variación de la densidad de la madera – 33

3.2 Métodos radioactivos – 33

4 Crecimiento de los árboles – 35

4.1 Crecimiento en altura – 42

4.2 Crecimiento en diámetro – 43

4.2.1 Instrumentos para medir el crecimiento en diámetro – 43

4.3 Crecimiento en área basimétrica – 46

4.4 Crecimiento en volumen – 46

4.5 Crecimiento relativo – 47

4.6 Funciones de crecimiento – 50

4.7 Crecimiento de los rodales – 51

5 Predicción del crecimiento – 53

6 Incremento – 57

6.1 Incremento Corriente Anual – 58

6.2 Incremento Periódico – 59

6.3 Incremento Medio Anual – 59

6.4 Incremento Periódico Anual – 60

6.5 Análisis del Crecimiento y de los Incrementos – 61

7 Modelos de producción y crecimiento – 67

Bibliografía – 69

Introducción

La dasonomía es el estudio de la conservación, cultivo y aprovechamiento de los bosques o arbolados y suele generalizarse como la ciencia forestal por excelencia; considerada actualmente como una de las bases fundamentales de la Silvicultura y la Economía Forestal.

La dasonomía da origen a variadas ramas o técnicas relacionadas con sus propósitos. Así, la dasimetría es la parte de la dasonomía que se encarga de la medición de árboles, determinación del volumen de los bosques y crecimiento de sus componentes, los árboles, y los bosques en general (*dasos* = bosque; *metros* = medida).

La dasimetría, por tratarse de mediciones, tiene tres propósitos esenciales relacionados entre sí: La dendrometría, que trata de la medición de las dimensiones de los árboles y estudia su forma y determinación de su volumen; La dasimetría propiamente dicha que se encarga de los aspectos relacionados con la estimación métrica y cubicación de la masa forestal, la cual debe entenderse como el conjunto de árboles que conviven en un espacio común; suele decirse que se ocupa de la estereometría de la masa forestal. Finalmente la epidometría, que estudia las técnicas de medición y las leyes que regulan el crecimiento e incremento de los árboles individuales, y la producción de las poblaciones forestales o árboles.

Corresponde a la dendrometría la determinación de la composición morfológica del árbol, resolviendo las variables básicas medidas en los árboles: diámetro normal, altura de fuste, espesor de corte y la cubicación teórica del árbol con desarrollo de ecuaciones del perfil y para el cálculo de

volúmenes. Corresponde también a la dendrometría el estudio de la forma del tronco y de los factores de los que depende, así como los variados tipos dendrométricos, conjuntamente con el estudio de la forma de la copa y la arquitectura de la misma.

La dasometría por su parte se ocupa de la cubicación o determinación de la biomasa leñosa y foliar de las formaciones forestales; estudia la estereometría de la masa forestal mediante análisis uni- o multivariante de las relaciones entre variables identificables en la biomasa forestal y de la estructura del vuelo forestal. Considera también la cuantificación del volumen de la masa forestal mediante tarifas o tablas de cubicación, considerando evaluaciones relascópicas de las masas forestales.

Así, la epidometría se ocupa del cálculo del crecimiento del árbol, partiendo de consideraciones de la edad del mismo y de la forma de crecimiento diametral, en altura o en volumen. Logra estimaciones de la edad del árbol y su efecto en la densidad de la madera resultante y puede llegar a predecir el crecimiento mediante modelos de predicción para la producción y crecimiento de las masas forestales. En los capítulos siguientes se desarrollan estos temas, que completarán el conocimiento de los profesionales forestales en esta importante rama de la dasonomía.

1

Edad

Los árboles como otros seres vivos crecen, se reproducen y mueren. Para la Ingeniería Forestal es importante que cada una de estas fases de la vida del árbol quede muy bien comprendida para que puedan existir coherentes planes de ordenación forestal que permitan la perpetuación del recurso forestal. En general se conoce que la edad de cualquier organismo vivo es el periodo de vida que tiene, considerado desde su origen o surgimiento hasta un punto determinado en el tiempo. En Ingeniería Forestal se suele definir la edad del árbol como el número de años transcurridos desde la germinación de la semilla, o de la brotación de las cepas de una raíz, hasta el momento en que es observado o medido (Souza, 1973).

Genéricamente el estudio de la edad y del crecimiento del árbol, de las masas forestales o bosques y de sus implicaciones son tratados por la epidometría forestal. Epidometría proviene de los vocablos griegos-latinos: epidosis = edad y metros = medida. Consecuentemente la epidometría forestal es la especialidad que trata de todos los aspectos relacionados con la edad del árbol y las poblaciones forestales; entre los cuales se encuentran el crecimiento e incremento maderable de los árboles individuales, elementos imprescindibles para determinar o estimar la producción y el rendimiento maderable de las masas o poblaciones forestales.

Aparentemente, la edad de un bosque, de un rodal o macizo forestal, se torna un concepto vago porque no todos los árboles que se encuentran en una comunidad arbórea tuvieron su crecimiento inicial al mismo tiempo. En ese sentido se expresa la edad media de los árboles como una mera

aproximación; sin embargo, para las prácticas de ordenación y conceptos de manejo forestal, se hace necesario que los masas de los bosques naturales y/o de las plantaciones deben estar necesariamente caracterizados por una edad o clase de edad bien definida. Así, cuando los árboles existentes en una plantación son de la misma edad, se denominan plantaciones de edades coetáneas y si se trata de macizos forestales se denominan equietáneas o equiáneas. Normalmente las plantaciones resultantes de reforestaciones pertenecen a esta categoría, donde los árboles se encuadran en una misma clase de edad. Por su parte, los bosques nativos son generalmente macizos multiáneos, también llamados de edades múltiples o variadas. En la literatura se encuentra también la expresión de edades irregulares cuándo las plantaciones forestales o bosques naturales presentan árboles con diferentes edades.

Los árboles fácilmente consiguen llegar a más de 100 años de vida. Muchos individuos arbóreos del bosque tropical probablemente alcanzan edades entre 100 y 700 años (Botosso y Mattos, 2002). Se conoce que el árbol más viejo del mundo, aún en pie, es un *Pinus aristata* que habita en el estado norteamericano de California con una edad estimada entre 4.200 e 4.600 años.

La posibilidad de conocer o estimar la edad de los árboles permite hoy en día contar con sólidos fundamentos de interpretación en las ciencias forestales, como la ecología y son imprescindibles para determinar cómo aplicar correctos ciclos de corta, raleos y otras actividades silviculturales y para efectuar un aprovechamiento sostenible, así como para estudiar la dinámica de poblaciones vegetales y la productividad de ecosistemas. Para este propósito, conocer la edad como un parámetro medible, se transforma en una herramienta de decisión de apreciable valor.

En la mensura (medición) forestal, la edad de un árbol es un parámetro variable muy importante, especialmente cuándo se trata de estimar la producción forestal y la planificación de su consecuente aprovechamiento maderero. Fundamentalmente es utilizada en las evaluaciones del crecimiento y de la productividad de un sitio y desde este punto de vista es esencial cuando se consideran planes de ordenación forestal. Como tal, la edad es utilizada como herramienta para definir las prácticas silviculturales y la interpretación del crecimiento presente y futuro del bosque determina

cuales deben ser las decisiones de planificación del aprovechamiento maderero sostenible en el tiempo. Por tanto, conocer la edad permite:

- Evaluar el incremento en términos de diámetro, área basimétrica, volumen y altura de una especie en un determinado sitio, permitiendo así comparar la capacidad productiva de diferentes sitios;
- Estimar el crecimiento en altura de los árboles dominantes en los rodales y macizos forestales, para construir las correspondientes curvas de índice de sitio, de modo que se pueda determinar la capacidad productiva de los sitios donde esas comunidades arbóreas están implantadas;
- Definir parámetros dasonómicos para que sean utilizados en las prácticas de manejo y de ordenación forestal, sirviendo principalmente como base comparativa entre comunidades forestales y para decidir metas correspondientes para el aprovechamiento del bosque.

Reconocida la importancia de conocer la edad de las formaciones forestales, su determinación implica frecuentemente muchas dificultades, inclusive cuándo se trabaja en zonas templadas con menos complejidad estructural, siendo mayores las dificultades cuándo se trabaja con formaciones forestales en las regiones tropicales, más complejas estructuralmente.

En el caso de las plantaciones forestales o de las reforestaciones la manera más expedita y segura de conocer la edad es analizando los registros pertinentes (fichas, catastros o archivos de bancos de datos). Trabajando en bosques naturales éste procedimiento no es posible realizarlo, en vista de que éstas comunidades forestales están compuestas de varias especies con diferentes edades; por lo que es necesario que el ingeniero o técnico forestal utilice determinadas técnicas que le permitan obtener la edad de los árboles o del bosque.

En las prácticas dasométricas, la variable edad comprende el período, en años, que ha transcurrido desde el comienzo de la vida del árbol hasta el momento en que la comunidad forestal se encuentra en su última fase de crecimiento, período de senescencia o senilidad de los árboles. Se diferencia de la edad de rotación comercial, que se refiere al año en que los árboles deben ser cortados siguiendo los principios técnico-científicos establecidos

en los correspondientes planes de ordenación. Por su lado, la edad de corte indica cuándo los árboles deberán ser abatidos o cortados.

La edad de senilidad, senescencia, decrepitud o de declinamiento, se refiere al periodo cuándo los árboles muestran señales evidentes y visibles de una reducción o disminución del crecimiento biológico del individuo, como resultado de la disminución de sus actividades fisiológicas. Finalmente, la edad fértil de una comunidad arbórea se define al periodo de fructificación de los árboles, que muchas veces puede acontecer después de prolongados intervalos de tiempo donde los árboles no producen frutos.

Una consecuencia visible de la edad, es el crecimiento reflejado en el aumento del tamaño de los árboles. Sin embargo, sobre este periodo de tiempo el tamaño del individuo arbóreo es el resultado de las interacciones de la capacidad genética, inherente al individuo, y del sitio en el cual está se está desarrollando. En el periodo de crecimiento intervienen también factores climáticos, tales como temperatura, humedad del aire, duración e intensidad de luz, y otros factores, como la fertilidad del suelo, los cuales se constituyen en elementos decisivos para el crecimiento de los árboles, periodo conocido como estación o época de crecimiento.

Las alteraciones de esas condiciones ambientales, pueden producir periodos de crecimiento estacionario en las plantas, que en muchos árboles se refleja en la estructura anatómica de la madera que adquiere características anatómicas estructurales muy bien definidas y fácilmente observables. Es la respuesta a tales procesos fenológicos que marcan el comienzo y fin de la estación de crecimiento. De este modo, de acuerdo a la precisión que se desee en la determinación de la edad de un árbol, se puede recurrir a métodos de medición que permiten estimarla.

2

Estimación de la edad

2.1 Por observación

Se puede estimar la edad de un árbol por su tamaño o apariencia general, a través de un simple análisis visual. Este método requiere de mucha experiencia y práctica; el mensurador debe estar completamente familiarizado con el comportamiento silvicultural y las características fenológicas de la especie o especies y del ambiente donde el árbol o los árboles se desenvuelven; es necesario por tanto un profundo conocimiento del ritmo de crecimiento de las especies existentes en el área de estudio. La estimación de la edad es muy subjetiva y bastante inexacta, puesto que se basa en la historia del bosque y en las características morfológicas de las especies, como el alisamiento y cambio de la coloración de la corteza: como tal, su uso está generalmente restringido para agrupar árboles en intervalos de clases de edad de 10, 15, 20 o más años.

Sin embargo, este método puede ser utilizado cuándo se trata de clasificar los árboles silviculturalmente, considerando la posibilidad de identificación de los individuos para el ingreso en los respectivos planes de ordenación y de manejo forestal. En este sentido, los árboles pueden ser clasificados en brinzal, latizal y fustal.

Brinzal es el individuo que tiene más de 2 metros de altura pero que aún no lleva consigo el diámetro mínimo establecido. Latizal se refiere al árbol que puede ser cortado para la finalidad previamente definida en el respectivo plan de ordenación, vale decir que son individuos que llevan las

características mínimas para el aprovechamiento maderero. Estos individuos arbóreos pueden, luego de determinados tratamientos silviculturales, obtener dimensiones mayores, tornándose económicamente más rentables. Fustal es el árbol maduro que ingresa obligatoriamente en los planes de corte y aprovechamiento, una vez que su crecimiento se encuadra con los mayores índices de producción maderera.

En un rodal multiáneo, por ejemplo, existen árboles dominantes (los que ocupan el estrato superior del dosel del bosque) y dominados (los que están posicionados en el sub-bosque). Los tamaños y la forma de los árboles siempre estarán afectados y dependientes de las características del sitio y de las condiciones en que están creciendo. Así, los árboles de una misma especie y con la misma edad podrán presentar notorias diferencias en sus variables dendrométricas, pudiendo presentar valores semejantes en el diámetro a la altura del pecho (DAP) pero muy diferentes en altura total. En ese sentido una de las finalidades de la silvicultura es orientar y optimizar el crecimiento de los árboles a través de la manipulación de los efectos del sitio, principalmente de la intensidad de luz disponible para el crecimiento correspondiente.

2.2 Conteo de los verticilos

Algunos árboles como las Araucarias (y otras especies de coníferas) muestran una forma típica de crecimiento que en botánica se denomina de crecimiento monopodial (cuándo presenta solo un ápice definido como yema apical) (Figura 1). Cuándo deja de existir la predominancia del crecimiento de la gema apical, entran en actividad las yemas subyacentes que dan origen a las diversas ramas formando el crecimiento simpodial (Figura 1), situación que se presenta en la mayoría de los árboles tropicales.

Muchos árboles de la especie *Pinus* spp. forman en algunos sectores del tronco una estructura particular en forma de nudos, de donde nacen las ramas laterales, formando anualmente lo que se denominan verticilos. Este fenómeno se explica en el sentido de que al final de cada época de reproducción vegetativa, el árbol origina en la punta de su último brote la yema apical; con el inicio de la siguiente época de crecimiento vegetativo, esta yema continúa creciendo desarrollando una nueva yema apical con un nuevo brote formando en su base los verticilos.

Contando el número de verticilos se puede estimar la edad del árbol asociando el número de verticilos a la edad del individuo en años; sin embargo, solamente en algunas especies forestales el número de verticilos a lo largo del tronco corresponde exactamente a la edad del árbol. Las especies forestales que presentan esa característica normalmente crecen en climas templados; en el Brasil, la especie que crece con esa característica es *Araucaria angustifolia* (Bert.) Kuntze (Pinheiro do Paraná) (Figura 2); en Chile y en el sur de la Argentina la especie *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch (Piñonero, Pehuén) presenta también esta característica de crecimiento.

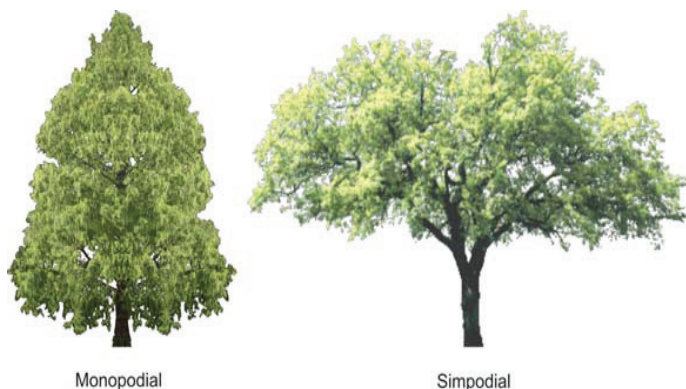


Figura 1. Formas de crecimiento de árboles en función de la yema apical



Figura 2. Pinheiro Preto de 11 años de edad (izquierda) y Pinheiro do Paraná de 12 años de edad (derecha)

Un inconveniente con esta forma de determinar la edad de los árboles, es la tendencia natural de los verticilos ubicados en la sección inferior del árbol de perderse con el avance del tiempo, pudiendo dificultar la determinación de la edad real del individuo. Para utilizar este método es indispensable conocer bien el hábito de la ramificación de la especie; puede acontecer que algunos árboles individuales, en sitios específicos, formen además del verticilo anual uno o dos verticilos más por año, o que formen los verticilos en períodos superiores a un año.

Midiendo la distancia entre dos verticilos se puede también determinar el correspondiente crecimiento en altura. En este caso, la distancia entre los verticilos puede corresponder al incremento en altura de un año para el otro. No existen registros de que este método de determinación de la edad de los árboles, o del bosque, por medio del conteo de los verticilos haya sido utilizado en áreas tropicales y subtropicales.

2.3 Conteo de los anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento resultan de la sobre posición sucesiva de las capas de tejidos leñosos en el tronco del árbol, en razón de la actividad periódica del cambium. Así, la actividad del cambium va acumulando año a año capas sobrepuestas que van a originar la formación de los anillos de crecimiento. Los anillos de crecimiento se inician en la médula del árbol y continúan hacia la corteza; consecuentemente la formación de los anillos de crecimiento tiene lugar en el cambium del árbol. Junto a los anillos se forman también los radios leñosos (rayos medulares o del xilema), elementos anatómicos que actualmente vienen adquiriendo mayor importancia en la investigación dendrocronológica, la ciencia que se ocupa del análisis de los anillos de crecimiento desde una perspectiva temporal y que ha dado origen a la dendroclimatología, que constituye una disciplina especializada que permite extraer y seleccionar la información de carácter climático contenida en la variabilidad de los datos dendrocronológicos.

El anillo de crecimiento está compuesto básicamente de dos capas de tejido meristemático, la primera de tonalidad más clara que es llamada de leño inicial, temprano o primaveral, y la segunda de tonalidad más oscura denominada de leño tardío o secundario; son en consecuencia resultado de la actividad del cambium del árbol en dos períodos: la vegetativa y la

relativa al reposo fisiológico de la especie, equivalente al período de stress fisiológico, inadecuado para el crecimiento.

En sitios donde existen claramente diferenciados períodos específicos de verano e invierno, o de lluvias y sequías, el crecimiento de los árboles se refleja en esas características, originando sectores que, comparativamente, crecen más y sectores donde el crecimiento es mínimo y, en muchos casos, es nulo. Esa diferencia de crecimiento entre los tejidos del leño inicial o temprano y leño tardío, representados en las capas sobrepuestas, produce nítidamente áreas más o menos concéntricas que son denominadas anillos de crecimiento (Figura 3). Sin embargo, algunos cambios expresivos en la cantidad de la luz diaria disponible (iluminación directa al árbol) pueden ocasionar crecimientos diferenciados que podrían reflejarse en la formación de los anillos de crecimiento.

La formación de los anillos de crecimiento requiere consecuentemente de la existencia de un período de stress fisiológico durante el año, lo que se asocia a climas de la región templada, es decir que en ese tipo de clima la formación de los anillos queda bien definida y puede aceptarse reflejan la edad del árbol.

Los primeros relatos sobre la medición de la edad mediante el conteo de los anillos de crecimiento, se remontan a observaciones realizadas en la Grecia antigua y durante el siglo XVI cuándo Leonardo da Vinci identifica



Figura 3. Anillos de crecimiento en un individuo de *Pinus silvestris* L.

en árboles de *Pinus* en la región de la Toscana (Italia) la existencia de una relación entre los anillos de crecimiento y el clima local, deduciendo que los anillos de crecimiento permiten estimar la edad correspondiente de los árboles y en función del ancho de esos anillos, la posibilidad de indicar los años que han sido más o menos secos que otros (Botosso y Mattos, 2002).

El conteo de los anillos de crecimiento que es realizado en la base del tronco, suele indicar con mayor precisión la edad del individuo observado; mientras que en la parte superior del tronco existe evidentemente menor número de anillos, toda vez que las capas de formación del leño se acumulan en la parte inferior del tronco.

En los árboles cortados (abatidos), los anillos de crecimiento pueden ser observados en segmentos de troncos cortados en forma de discos o en cortes transversales del tronco. En árboles en pie, las muestras que se extraen de forma cilíndrica, obtenidas mediante el uso del Taladro o Barreno de Pressler, se denominan tarugos de incremento (Figura 4).

En las dos últimas décadas, del estudio de los anillos de crecimiento surgieron las especialidades de la dendrocronología y la dendroclimatología. La dendrocronología se refiere al conocimiento que hace posible la identificación de fechas precisas del crecimiento del leño, relacionándolas con datos biológicos (por ejemplo la cantidad y calidad del polen de especies vegetales en determinados períodos) y de las variaciones ecológicas y ambientales ocurridas en el sitio donde se encuentran o se encontraron esos árboles. En la dendroclimatología, los anillos de crecimiento permiten la identificación y la reconstrucción de las condiciones del clima que existie-

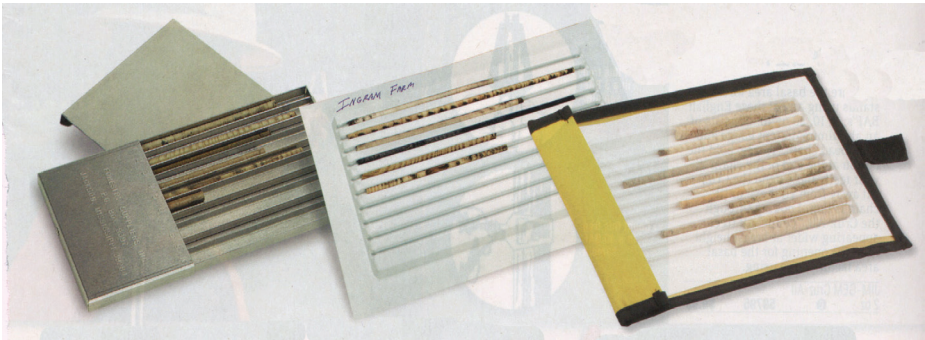


Figura 4. Muestras de madera extraídas con el Barreno de Pressler

ron en esos sitios y, consecuentemente, reconocer las alteraciones ambientales naturales que influyeron directamente en la dinámica de las poblaciones arbóreas e indirectamente sobre el comportamiento del recurso hídrico y sus correspondientes procesos geomorfológicos (Tomazello, et. al., 2001).

Estas nuevas especialidades forestales re-encauzaron la importancia que adquiere el estudio de los anillos de crecimiento; en varias universidades del hemisferio norte, donde se desarrollan estudios tradicionales de la ciencia forestal, así como en Chile, Costa Rica y Colombia fueron creadas lo que vienen llamándose Laboratorios de Dendrocronología. Complementariamente el desarrollo de instrumentos como el Lintab (Figura 5) y de paquetes informáticos como el WinDendro (www.lab-ferrer.com), van prestando facilidades que permiten prestar especial atención por parte de los investigadores de estas nuevas especialidades.

Con el Lintab, que es en esencia un instrumento medidor de tarugos de madera, se mide la distancia existente entre los anillos de crecimiento anual. Se trata de un moderno instrumento, con soporte electrónico digital, que está equipado con una lupa estereoscópica y una pantalla de LED, y que mediante el uso de paquetes computacionales permite el traspaso de los valores medidos a un sistema computacional.



Figura 5. Instrumento Lintab. Fuente: www.rinntech.com

Para facilitar el conteo de los anillos de crecimiento son utilizados lentes, colorantes, luz, alcohol, gasolina, rayos ultravioletas, pulidez de la superficie y a veces leve quemadura de la superficie de los discos de muestra.

Como las especies tropicales y subtropicales normalmente no presentan un claro contraste entre el leño inicial y el leño tardío, no siempre existe una perfecta diferenciación entre los períodos de crecimiento en función de un periodo seco que se reflejen en los anillos de crecimiento; en consecuencia, en climas tropicales y subtropicales este método aún precisa de muchos trabajos de investigación como para ser utilizado con confianza. Para las especies de clima templado, especialmente las coníferas, el método es bastante preciso y tiene importante uso práctico. Naturalmente, es posible que ocurra la formación de los llamados falsos anillos de crecimiento, producidos como consecuencia de sucesivos períodos cortos de sequía y lluvias, ataque de insectos, enfermedades, heladas e otros factores, que originan más de un ciclo de crecimiento durante el período de un año, complicando la estimación de la edad por este medio. En el trópico, también existen los llamados anillos sobrepuestos, causados por un crecimiento irregular de la madera, especialmente en la madera de los denominados aletones, contrafuertes o raíces tubulares, donde es posible encontrar configuraciones de anillos sobrepuestos que probablemente son formados por el efecto de la abundancia de agua en los suelos, lo que obliga en algunas especies a disminuir la actividad de absorción de nutrientes, causa probable de la formación de esos anillos.

Así, la determinación de la edad de los árboles en especies tropicales, a través del conteo de los anillos de crecimiento, resulta un trabajo mucho más complejo, puesto que existe poca información. Además, se debe considerar que: a) no todas las especies caducifolias forman anillos de crecimiento; b) algunas especies siempre verdes forman estructuras muy similares a los anillos de crecimiento, conocidas como zonas de crecimiento (Figura 6); c) algunas especies mantienen el ciclo de crecimiento estrictamente influenciado por las lluvias; y d) presentan una discontinuidad de la estructura colorida. En consecuencia, en los trópicos, la determinación de la edad de los árboles constituye uno de los problemas que precisa ser solucionado por la investigación de la ciencia forestal.



Figura 6. Zonas de crecimiento en especies tropicales

2.3.1 Barreno de Pressler o barreno de incremento

Este instrumento de origen sueco (en inglés *increment borer*) sirve para extraer muestras cilíndricas del leño. El instrumento consta de tres componentes: el barreno propiamente dicho, el soporte tubular cilíndrico y el extractor o cucharilla-estilete (Figura 7).



Figura 7. Componentes del Barreno de Pressler

El barreno de Pressler es un instrumento utilizado para obtener muestras de madera, en forma de tarugos, que permiten el conteo de los anillos de crecimiento en árboles en pie. Para extraer una muestra cilíndrica de madera o tarugo, primeramente se debe introducir el barreno en el tronco en forma rotativa, perpendicularmente al eje vertical del árbol (en dirección de la médula) y luego, con el extractor, se retira la muestra cilíndrica de la madera, también denominada de rollo o tarugo de incremento (Figura 4).

2.3.2 Ventanas en el árbol en pié

Al provocar una herida en el cambium (la zona ente la corteza del árbol y la leña), se estimula la presencia de tejido traumático que origina cicatrices en el tronco, fácilmente identificables después de algunos años; esta es la base técnica de las ventanas que suelen realizarse en los árboles en pié, conocidas en inglés como “cambial wounding” (Mariaux, 1967). Se suele abrir una pequeña ventana de 5 cm x 5 cm en la corteza ubicada justamente en la zona del cambium (Vetter, 2000). Pasados algunos años, 3 o 5 usualmente, se extrae una muestra transversal del tronco o preferiblemente un disco, a la altura de la herida provocada y se cuenta el número de zonas de crecimiento entre la cicatriz de la herida y la corteza; tal conteo corresponde al número de años transcurridos desde el momento en que se hizo la herida, hasta el momento de observación.

2.4 Estimaciones de la edad mediante fórmulas matemáticas

Varios intentos aplicando teorías y fórmulas matemáticas fueron conducidos para la determinación de la edad de los árboles sin considerar los anillos de crecimiento. Parde (1961) desarrolló una fórmula matemática tentando dar solución a esa problemática, la misma que fue comprobada y aplicada en los trópicos por Loján (1966). La fórmula de Parde es:

$$\frac{dx}{dt} = g - mx^2$$

donde:

dx/dt = derivada con respecto al tiempo del incremento

g = primer factor, que permitió el crecimiento

x = variable mediante la cual se mide el crecimiento
 m = constante

Esta ecuación puede ser transformada en la siguiente fórmula de trabajo:

$$t = \frac{1}{K_2} \cdot \log e\left(\frac{K_1 + x}{K_1 - x}\right)$$

donde:

t = edad en años

x = variable en la edad t (actual)

K_1 e K_2 = constantes

Para calcular las constantes K se consideran mediciones del diámetro o circunferencia del tronco en sucesivos años:

$$K_1 = \sqrt{\frac{x_2^2(x_1 + x_3) - 2 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}{2x_2 - (x_1 + x_3)}}$$

Donde:

x_1 = diámetro o circunferencia en el 1° año

x_2 = diámetro o circunferencia en el 2° año

x_3 = diámetro o circunferencia en el 3° año

$$K_2 = \log e\left[\left(\frac{K_1 + x_2}{K_1 - x_2}\right)\left(\frac{K_1 - x_1}{K_1 + x_1}\right)\right]$$

Donde:

x = diámetro o circunferencia en la edad t

$\log e$ = logaritmo natural.

Si bien la estimación de la edad de un árbol aparece compleja, la misma se convierte en un proceso problemático cuando se refiere a la estimación o la determinación de la edad de bosques de edades múltiples; tal situación se presenta normalmente en los bosques naturales. Para solucionar tales problemas, se han desarrollado algunas fórmulas matemáticas que toman en consideración los volúmenes de los árboles que constituyen la masa forestal. Block estableció la siguiente relación para determinar la edad (E) del bosque (Prodan, 1965:

$$E = \frac{V_1E_1 + V_2E_2 + \dots}{V_1 + V_2 + \dots} = \frac{\sum V_i E_i}{\sum V_i}$$

donde:

V = volumen en m³ correspondiente a los árboles en la edad pertinente

E = edad

De acuerdo con Tischendorf la edad del bosque se puede obtener considerando los respectivos incrementos (i) por clases de edad (Prodan, 1965):

$$E = \frac{i_1E_1 + i_2E_2 + \dots}{i_1 + i_2 + \dots} = \frac{\sum i_i E_i}{\sum i_i}$$

2.5 Análisis del tronco

La producción forestal de un determinado rodal o bosque nativo puede ser estimada con bastante precisión a partir del estudio del crecimiento de los árboles individuales o del bosque como un todo. En general, este tipo de estudio es realizado por medio de inventarios forestales continuos ejecutados en parcelas permanentes y en intervalos de tiempo predeterminados (normalmente de 3, 5 o 10 años).

Así, el análisis del tronco se presenta como una interesante alternativa para evaluar el crecimiento pasado de un árbol, de forma rápida y precisa, permitiendo la realización de inferencias sobre la producción maderera futura del bosque. Este método adquiere importancia toda vez que en cualquier época se puede reconstituir el pasado de un árbol, sintetizando su comportamiento desde su fase juvenil hasta el momento en que es realizado el análisis.

El análisis del tronco también es conocido como análisis del fuste o análisis troncal, y consiste en la medición, equidistante o no, de cierto número de discos o secciones transversales del tronco de un árbol para determinar el crecimiento y el desarrollo en los diferentes períodos de la vida del individuo observado. Esta técnica permite determinar el crecimiento pasado de los árboles individuales (Silva y Paula Neto, 1979), gráficamente demostrado en la Figura 8.

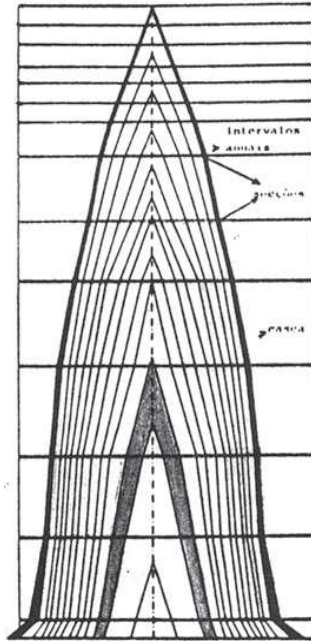


Figura 8. Corte longitudinal del fuste, reconstituido por el análisis del tronco (Finger, 1992)

El análisis del tronco es adecuado para especies que tienen anillos de crecimiento fácilmente observables, como resultado de la actividad del cambium (tejido divisorio entre floema y xilema) de los árboles durante los períodos de máxima actividad vegetativa y de períodos de reducción de las actividades fisiológicas (Finger, 1992). En este caso, el procedimiento para el conteo de los anillos de crecimiento consiste en la realización de un análisis del tronco, que puede ser completa o parcial.

En rodales equiáneos la selección de los árboles muestra se realiza en las clases dominantes y codominantes (árboles más altos del rodal). Estos árboles proporcionan la garantía de que tuvieron un crecimiento sin mucha competencia con los demás árboles del bosque o del rodal, lo que asegura la existencia de una distribución de los anillos de crecimiento más uniforme.

El procedimiento requiere muchas veces de la tumba o corte del árbol para efectuar el corte del tronco en secciones con distancias predefinidas para extraer de sus extremos más gruesos los llamados discos de muestra (Figura 3) donde se realiza el conteo de los correspondientes

anillos de crecimiento. Se recomienda que cada disco tenga entre 3 y 5 cm de ancho y esté numerado identificando la sección del tronco y del árbol considerado. El análisis del tronco, además de permitir la determinación de la edad del árbol, también proporciona la posibilidad de conocer en sus diferentes fases de crecimiento los correspondientes crecimientos anuales en diámetro y altura y en consecuencia el crecimiento en área basimétrica o seccional y el volumen de madera producido en cada una de esas fases de crecimiento.

A continuación se muestra un ejemplo tomado de Mackay (1964) realizado en un árbol de *Pinus silvestris* L., donde se contaron en la superficie del tocón, 78 anillos de crecimiento y se midieron sucesivamente cada dos metros de altura los respectivos valores que están indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis del tronco de un árbol de *Pinus silvestre* L.

Variable	Altura da medición (m)									
	0,3	1,3	3,3	5,3	7,3	9,3	11,3	13,3	15,3	17,3
Número de anillos	78	72	65	60	54	48	37	28	16	0
Edad respectiva (años)	5	11	18	23	29	35	46	55	67	83
Diámetro de la sección (cm)	29,5	25,1	21,8	19,3	18,0	16,4	14,1	11,5	6,0	

La Figura 9 muestra el perfil longitudinal del tronco en función de los datos de la Tabla 1, resultado del análisis del tronco realizado en un árbol tumbado de *Pinus silvestre* L. (Mackay, 1964)

El análisis del tronco, además de ser usado para determinar la edad de los árboles, también puede ser útil para la interpretación del crecimiento en respuesta a los cambios de estación, de la cantidad de precipitación, en el estudio de las tasas de crecimiento y como herramienta en los planes de ordenación y manejo forestal (Brienen y Zuidema, 2003). Pueden ser clasificados en dos tipos, el análisis del tronco parcial y el análisis completo del tronco; como se indicó, en ambos casos se trata de contar los anillos de crecimiento.

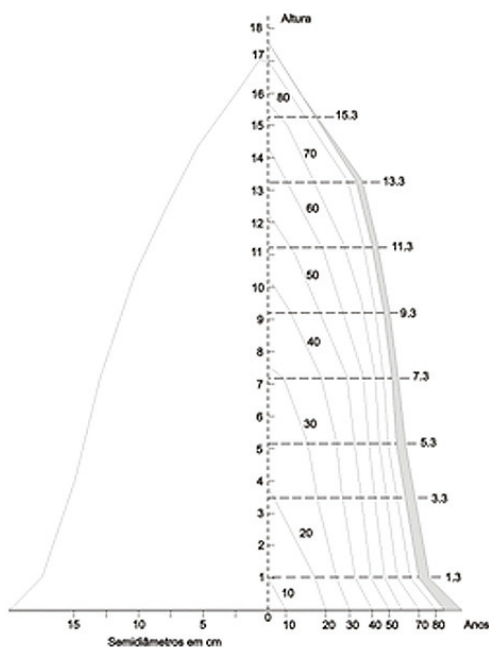


Figura 9. Análisis del tronco de un árbol de *Pinus silvestris* L. Fuente: Mackay, 1964 (modificado)

2.5.1 Análisis parcial del tronco (árbol en pie)

En el análisis parcial del tronco, el árbol no precisa ser cortado, se trata consecuentemente de un método no destructivo y puede servir en consecuencia para analizar mayor número de individuos mejorando la exactitud de las estimaciones..

Los anillos de crecimiento se cuentan en un pequeño cilindro de madera, tarugo, obtenido utilizando el Barreno de incremento o Barreno de Pressler (increment borer), aplicado en el tronco a la altura del DAP (1,30 m). De cada árbol a ser analizado se pueden extraer una o dos muestras, siendo lo usual retirar dos muestras de cada árbol manteniendo un ángulo de 90° entre los puntos de extracción. Las muestras deben ser acondicionadas en recipientes apropiados para evitar que se resequen o se quiebren. Se recomienda realizar la extracción de los tarugos a la altura del DAP, por efectos de estandarización. Se estima la edad final del árbol, contando el número de anillos de crecimiento a la altura del DAP, más la edad necesaria para que el árbol consiga llegar hasta esa altura de 1,30 metros de altura.

Cuando se usa este método se deben tomar en consideración algunas restricciones que pueden presentar las muestras extraídas, particularmente debido a la excentricidad de las secciones de las formaciones irregulares de los anillos y del tamaño de los mismos, principalmente en árboles de mayor edad y de grandes dimensiones. A pesar de estas restricciones, el conteo minucioso de los anillos de crecimiento permite una determinación rigurosa de la edad del árbol y permite realizar estudios precisos de los correspondientes incrementos.

Otra dificultad cuando se emplea esta técnica surge de la naturaleza del leño, puesto que aquellas especies, cuya madera tiene un grado de dureza tan alto, hacen muy difícil la penetración del barreno de Pressler en el tronco; se ha sugerido el uso de cuerdas que se enroscan sobre el tronco, como un torniquete, tal como se observa en la Figura 10, que ayudan a que el barreno penetre en el tronco. En casos imposibles de usar el barreno, deberá recurrirse al análisis completo del tronco.

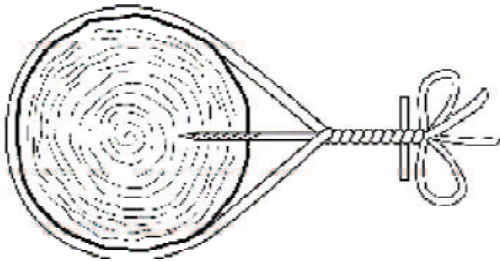


Figura 10. Uso de cuerdas como torniquete, para facilitar la penetración del barreno de Pressler. Tomado de Chave (2006)

2.5.2 Análisis completo del tronco (*árbol abatido*)

En la práctica forestal, la capacidad productiva de un determinado sitio puede ser determinada mediante inventarios forestales continuos utilizando unidades de muestreo permanentes; el inconveniente con este procedimiento es que demanda un largo período de monitoreo, además de consumir más trabajo y costos elevados de operación. Alternativamente, puede utilizarse el análisis del tronco completo, que puede realizarse en cualquier época para reconstruir el desarrollo de un árbol en términos de crecimientos pasados. Sin embargo, para este procedimiento el árbol tiene que ser

abatido o tumbado, previa selección mediante muestreo según el modelo estadístico que asegure mejor precisión en la estimación.

a) **Selección de los árboles muestra.**

Deben reflejar las características del sitio por lo que deben ser escogidos preferentemente árboles de los estratos dominantes y codominantes (individuos libres de competición). Si se desea estimar el valor medio de la población, deberán escogerse árboles que tengan preferencialmente el diámetro del área basimétrica media. Si el propósito es tener una estimación de todo el rodal, la muestra debe contener árboles de diversos sitios, de diferentes edades y de todas las clases sociológicas o de tamaño.

b) **Seccionamiento del árbol.**

Para el seccionamiento de troncos de los árboles seleccionados, se debe adoptar un esquema semejante al utilizado para la realización de la cubicación rigurosa. Se debe procurar obtener la máxima variación posible, tomando en consideración el costo del proceso y de los aspectos operacionales.

Seleccionado el árbol muestra este será cortado y de él retirados los discos (secciones transversales del tronco), empezando por la extremidad inferior del tronco próximo a la altura de 0,30 m siguiéndose hasta el ápice del tronco.

Cuando se realizan estudios detallados deben obtenerse mayor número de discos en la sección inferior (1ª sección), colectando discos a 0,50 o 0,70, a 1,0 y a 1,30 metros de altura. A partir de la altura del DAP el árbol puede ser seccionado cada metro o cada dos metros, dependiendo del largo del tronco. El tronco también puede ser seccionado en alturas relativas (Imaña *et al.*, 2002); en cualquier caso es recomendable seguir la secuencia más adecuada y ordenada posible. Además de la identificación de los discos se debe conocer el número de identificación del árbol, del sitio y la posición de donde fueron retirados los discos.

El grosor de los discos puede variar entre 3 y 5 cm, considerando que discos más finos se rajan con mucha facilidad y que discos más gruesos demoran demasiado en secar.

c) **Secado.**

Después de obtener los discos, éstos deben pasar por el proceso de secado y posteriormente de lijado. El secado de los discos debe ser realizado en locales aireados y a la sombra, con los discos en pie para obtener la mejor aireación; el proceso de secado estará concluido cuándo el contenido de humedad de los discos se encuentre en equilibrio con la humedad del aire.

En el caso de usar una estufa, el tiempo de secado se reduce significativamente bastando tres a cinco días en estufa con circulación de aire forzada, a temperaturas en torno de los 40 a 50 °C que son plenamente suficientes para el secado de los discos. En este caso el secado estará concluido cuándo los discos presenten pesos constantes, o sea, que no haya más pérdida de agua. Después del secado, los discos deben ser lijados para que los anillos de crecimiento sean más visibles y faciliten el correspondiente conteo y medición pertinente.

d) **Marcado de los radios de medición.**

Para medir el grosor de los anillos de crecimiento se trazan radios desde la médula hasta el borde del disco. Es conveniente el trazado de cuatro radios dispuestos perpendicularmente. El grosor estimado de los anillos de crecimiento que se obtenga de la media aritmética de los cuatro radios será evidentemente más representativo.

En especies donde los anillos de crecimiento no son nítidos se pueden utilizar colorantes químicos como fucsina, azul de metileno u otros para mejorar la visualización de los anillos.

e) **Medición de los anillos.**

La medición del número y espesor de los anillos se realiza sobre los radios trazados, considerándose que la médula es el punto cero. Para la medición pueden usarse reglas o aparatos ópticos (lupas) o equipos específicos para esa finalidad como el equipo computarizado desarrollado por Aniol (1991).

Es recomendable realizar un buen análisis de los anillos de crecimiento a la altura del pecho (DAP), puesto que es el parámetro de referencia para estimar otras variables. Cuando se han realizado mediciones tanto del número como el espesor de los anillos de creci-

miento pueden lograrse correlaciones interesantes para estimar posteriormente el crecimiento del árbol. En la Figura 11 se presenta el espesor de los anillos en cada uno de los anillos (léase edad del árbol) cuando se hacen mediciones del disco a la altura del pecho (DAP).

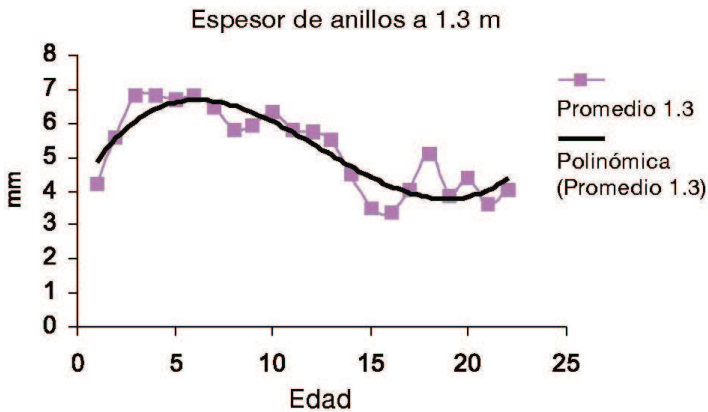


Figura 11. Espesor de los anillos de crecimiento en función de la edad a la altura del DAP en *Prosopis ruscifolia* Griseb. Tomado de Giménez et al, 2005.

f) **Trazado del perfil longitudinal del árbol.**

A partir de los datos medidos, se pasa a diseñar el perfil longitudinal del árbol, de donde se puede estimar su edad, altura, diámetro, áreas basimétricas y transversales y correspondiente volumen.

En la construcción del perfil longitudinal se observan los datos y se transfieren a un papel milimetrado, sobre el cual se marcan los pares de datos en un sistema de ejes coordenados. Uno de los ejes debe ser considerado para marcar las alturas donde fueron retirados los discos hasta la altura total, usualmente el eje de las abscisas, eje x, y en el eje y el diámetro correspondiente. Después de la marcación de los diámetros en cada nivel de altura se procede con la unión de los puntos correspondientes a cada anillo en el eje del árbol. La unión de los puntos se efectúa de la corteza hacia la médula, formando así el gráfico del análisis del tronco (Figura 12). La Tabla 2 presenta un ejemplo de un análisis completo del tronco.

Tabla 2. Análisis completo del tronco

Edad años	DAP (cm)	Id (cm)	G (m ²)	Ig (m ²)	H (m)	Ih (m)	V (m ³)	Iv (m ³)
10	1,44	1,44	0,0002	0,0002	2,0	2,0	0,0008	0,0008
20	6,96	5,52	0,0038	0,0036	6,3	4,3	0,0113	0,0105
30	11,54	4,58	0,0105	0,0067	10,9	4,6	0,0522	0,0409
40	16,08	4,54	0,0203	0,0098	15,6	4,7	0,1637	0,1135
50	19,79	3,71	0,0308	0,0105	20,3	4,7	0,3415	0,1738
60	23,83	4,04	0,0446	0,0138	23,6	3,3	0,5814	0,2399
70	27,14	3,31	0,0578	0,0132	26,3	2,7	0,8480	0,2666
80	30,36	3,22	0,0724	0,0146	29,3	3,0	1,1450	0,2970
90	33,28	2,92	0,0870	0,0146	30,5	1,2	1,4455	0,3005
100	35,81	2,53	0,1007	0,0137	32,1	1,6	1,7130	0,2675
103	36,79	0,98	0,1063	0,0056	32,4	0,3	1,8070	0,0940
c/corteza	37,97		0,1132		32,4		1,9354	

Fuente: Prodan, 1965

DAP = diámetro a la altura del pecho (1,30 m), Id = incremento en diámetro, g = área basimétrica, Ig = incremento en área basimétrica, H = altura, Ih = incremento en altura, V = volumen, Iv = incremento en volumen

3

Estimación de la edad de árboles tropicales

La literatura registra la existencia de métodos directos e indirectos que pueden ser aplicados tanto en zonas templadas como en los trópicos para la determinación de la edad de los árboles. Todos esos métodos tratan de estimar, a costos relativamente altos, la edad de los árboles; sin embargo, cuando se tratan de árboles en el trópico, la estimación no siempre es fácil y deben recurrirse a otros métodos como la estimación de la densidad de la madera o métodos radioactivos.

3.1 Variación de la densidad de la madera

Esta metodología se fundamenta en la variación inter e intra específica de la densidad de la madera que presenta el árbol en sus diferentes fases de crecimiento. Los estudios se realizan en discos (método destructivo) y en muestras de madera extraídas con el Barreno de Incremento (Barreno de Pressler) (método no destructivo). En ambos casos la metodología se fundamenta en la estructura de los anillos de crecimiento. Se realizan en laboratorios utilizando técnicas de densimetría de rayos X o por medio de mediciones de rayos gama.

3.2 Métodos radioactivos

Comprende métodos de radiación de los isótopos radioactivos del carbono 14, también conocido como mediciones de radio carbono (^{14}C). El funda-

mento teórico consiste en determinar el grado y el tiempo pertinente de la radiación del carbón 14 que naturalmente existe y va siendo acumulado en la madera, junto con los átomos normales de carbón. Conforme va pasando el tiempo, considerando períodos bastante prolongados, el grado de radiación va disminuyendo, lo que permite una correcta identificación en el tiempo. Este procedimiento es bastante utilizado en trabajos antropológicos.

El establecimiento y mantenimiento de laboratorios que permitan trabajar con radiación de isótopos (que pueden ser de varios elementos no solo carbón), es bastante dispendiosa y precisa de personal altamente entrenado para esas actividades. Se usa solamente en casos muy excepcionales y se considera poco accesible en condiciones normales.

4

Crecimiento de los árboles

El crecimiento de los árboles puede ser medido a través de la modificación, a un mayor valor, de la magnitud de cualquier característica mensurable, como el diámetro, el área basimétrica, la altura, el volumen, el peso, la biomasa y otros. El crecimiento de los árboles individuales se refleja en el aumento de los tejidos (floema, xilema, tallo, parénquima) a través del tiempo, en el cual se produce la suma de la división celular, elongamiento del meristema primario y engrosamiento de las células del meristema secundario. En consecuencia se puede definir el crecimiento de los árboles como el resultado de la modificación conjugada de diversas variables dendrométricas como el diámetro, altura, área basimétrica, forma del tronco y volumen.

Las leyes del crecimiento biológico exigen una cantidad variada de atención crítica y pierden precisión y significado a medida que aumenta el período de tiempo sobre el cual ellos son aplicados (Medawar, 1941). Se reconocen cinco leyes del crecimiento biológico, resaltando que las mismas se refieren al crecimiento de organismos individuales:

1ª Ley: *El tamaño es una función monotónica creciente de la edad.*

En una expresión menos formal significa que los organismos no decrecen en tamaño cuándo quedan más viejos. Una afirmación más causal, como: “los organismos aumentan en tamaño a medida que aumentan en edad” sería mucho menos satisfactoria, pues contrasta el hecho de que, en el curso

de su desarrollo, los organismos se aproximan a un tamaño límite. Es plausible suponer que eso ocurra, considerando que la mayoría de las funciones comúnmente utilizadas para describir el curso del crecimiento son funciones con valores límites. Aún así, es importante no excluir la posibilidad de que los organismos alcancen un tamaño máximo en que permanezcan virtualmente estacionarios durante la parte más tardía de sus vidas.

2ª Ley: *los resultados del crecimiento biológico son, por sí solos típicamente capaces de crecer.*

El crecimiento biológico es fundamentalmente del tipo multiplicativo. Esta es la única “ley del crecimiento” comúnmente reconocida como tal. Esto justifica el uso casi universal de la diferencial relativa como una de las más probables en expresar, de modo significativo, cambios de tamaño.

$$\frac{dw}{dt \cdot W} = \frac{d}{dt} \cdot [\log_e(w)]$$

La estimación de esta expresión proviene de la tasa de crecimiento específico o tasa relativa de crecimiento. El caso especial de crecimiento por la ley del interés compuesto corresponde a una tasa de crecimiento uniforme específica.

3ª Ley: *En un ambiente sin perturbación el crecimiento ocurre a una velocidad constante, uniforme y específica.*

La constancia que la ley requiere se refiere al ambiente externo, pero también al interno. Del lado externo el trabajo debe ser hecho sobre un modelo de crecimiento, considerando que el ambiente permanece constante y que el medio interno de los organismos complejos no es accesible al tipo del control experimental que se exige. Se ha demostrado que aún en cultivos de tejidos y en poblaciones de organismos no celulares, estos pueden ser inducidos a crecer en función logarítmica por un lapso de tiempo significativo.

4ª Ley: Sobre ciertas condiciones de desarrollo, la aceleración específica del crecimiento es siempre negativa.

La tasa de crecimiento puede elevarse y después caer, como ocurre con cualquier organismo; el crecimiento se puede expresar por intermedio de una curva de tipo sigmoideal, donde la tasa específica de crecimiento siempre cae. Con alguna excepción para esta regla general, significa que “aquellos resultados del crecimiento biológico, aunque capaces de crecer, no son capaces de crecer tan rápido como sus precursores”. Por tanto la senescencia es un proceso que acontece continuamente a lo largo de la vida.

5ª Ley: la tasa específica de crecimiento declina más y más lentamente a medida que el organismo aumenta en edad.

La aceleración específica del crecimiento $\frac{d}{dt} \left[\frac{dw}{dt \cdot W} \right]$, por cuanto es siempre

negativa, se dirige progresivamente al valor cero durante el transcurso de la vida. De modo breve, “los organismos envejecen más rápido cuándo ellos son jóvenes” o también, “los organismos envejecen más lentamente cuándo ellos quedan más viejos”. La tasa específica de crecimiento disminuye como un importante parámetro en cualquier ecuación de crecimiento, y su valor puede, en ciertas circunstancias, ser medido por medios experimentales.

Consecuentemente, se entiende por crecimiento de un árbol, el aumento gradual del valor de las variables que de él se miden. Consiste en el aumento de los parámetros dendrométricos (diámetro, altura, área basimétrica y volumen). Ese aumento es producido por la actividad fisiológica de la planta (meristema primario y secundario del cambium) (Scolforo, 1994).

En términos de diámetro, su crecimiento se da en función de la actividad del cambium vascular. Las células formadas por el cambium vascular dan origen al leño, que a su vez, se diferencian en albura (parte más externa, con coloración más clara, con menor densidad y resistencia y con actividad fisiológica) y en duramen (parte más interna, coloración más oscura, de mayor densidad y resistencia y sin actividad fisiológica). En términos de altura, su crecimiento se da en función del meristema o yema apical, a través de las divisiones celulares.

El ritmo del crecimiento está influenciado tanto por factores internos (fisiológicos) y externos (ecológicos) como por el tiempo. Este último siempre va asociado al crecimiento y es por este motivo que se procura conocer la edad de un árbol. Lo que crece en un árbol en períodos sucesivos de tiempo es lo que se denomina incremento.

La determinación del crecimiento implica conocer el estado inicial, mensurable, de la magnitud creciente, así como el estado final y el correspondiente tiempo transcurrido entre un estado y otro. Ese crecimiento acumulado a lo largo del tiempo es denominado de producción forestal (Scolforo, 1994).

En la vida del árbol se distinguen diversos comportamientos del crecimiento en diámetro, altura, área basimétrica y volumen. Esto se estima o mide por medio del estudio de los anillos de crecimiento en especies de la zona templada y se considera, en términos generales, que en todos los árboles se sigue la misma tendencia. En los trópicos, los estudios sobre el crecimiento de los árboles aún son limitados, muchas veces porque los árboles no siempre presentan anillos de crecimiento visibles y continuos. En este caso, tanto para los bosques plantados como para los bosques nativos, el crecimiento de los árboles y del bosque como un todo, es obtenido por medio de mediciones y remediciones en parcelas permanentes.

Ambos procedimientos pueden combinarse para conseguir mejores estimaciones del crecimiento de los árboles. En Bolivia, se ha determinado a tasa de crecimiento de árboles del trópico boliviano combinando tanto la medición en parcelas permanentes como las mediciones en los anillos de crecimiento, Figura 12.

El crecimiento de un árbol aislado tiene pocas características que son similares al crecimiento de un rodal, por lo que el estudio del crecimiento de un árbol y de un rodal o bosque se efectúa por separado. Sin embargo, los parámetros de medición del crecimiento en diámetro, altura, área basimétrica y volumen de un árbol presentan comportamientos semejantes a lo largo del tiempo.

La definición del crecimiento pasado y del crecimiento futuro está implícita en su propio nombre. Es necesario identificar el crecimiento absoluto y el crecimiento relativo. Este último está definido como la razón del cociente entre el crecimiento anual y el valor de la magnitud del que procede, en el inicio del año o del período de evaluación. Veamos un ejemplo,

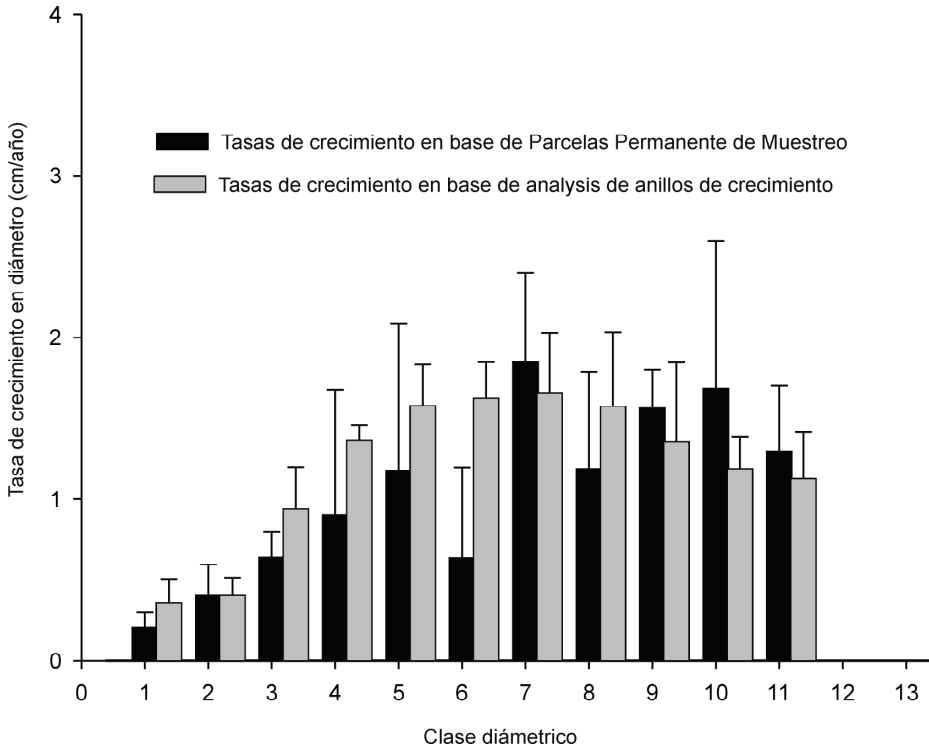


Figura 12. Tasa de crecimiento por categoría diamétrica de *Cedrelinga catenaeformis*, en base a mediciones de crecimiento de Parcelas Permanente de Muestreo, PPM (barras en negro) y mediciones en los anillos de crecimiento (barras en gris). Tomado de Brienen y Zuidema (2003)

considerando m y M como valores de la magnitud considerada al inicio y al final respectivamente, en el intervalo de n años, el valor del crecimiento relativo (Cr) se puede obtener por la fórmula algebraica de Breyman (Prodan *et al.*, 1997):

$$Cr = \left(\sqrt[n]{\frac{M}{m}} - 1 \right) \cdot 100$$

O por la expresión de Pressler (Prodan *et al.*, 1997):

$$Cr = \frac{2}{n} \cdot \frac{M - m}{M + m}$$

$$C_{AB} = \frac{\pi}{4} \cdot 2 \cdot DAP \cdot I$$

Representado gráficamente, se parece a una curva sigmoideal o curva en “S” (Figura 13), en que la primera fase corresponde a la edad juvenil, la segunda a la edad madura o rectilínea y la tercera a la edad senil (vieja). Cada fase mantiene un ritmo de crecimiento característico de la vida total del árbol y juntos forman la curva de crecimiento. La edad juvenil se caracteriza por un crecimiento rápido muchas veces del tipo exponencial. En la edad madura, el árbol normalmente presenta periodos iguales con crecimiento semejantes (rectilíneos). La edad senil se caracteriza por un crecimiento cada vez más insignificante, desde un punto de vista relativo, mostrando una asímptota de la curva.

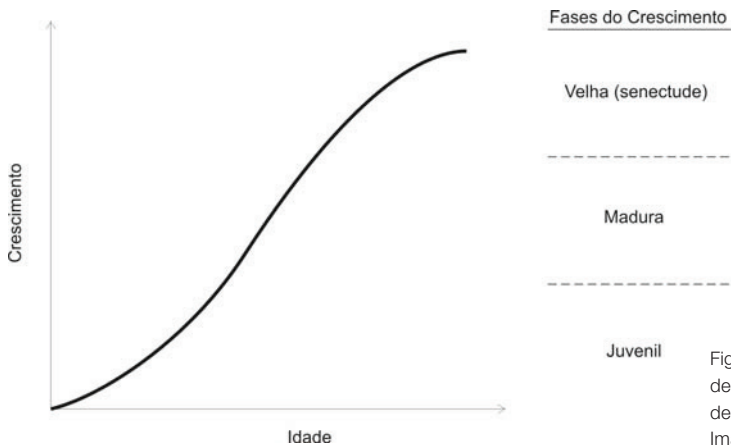


Figura 13. Forma típica de la curva de crecimiento de un árbol, Fuente: Imaña *et al.*, 2005.

El comportamiento de cada una de las variables dendrométricas del árbol no siempre siguen con rigor la tendencia de la curva en S, una vez que las proporciones relativas de esas variables depender de la especie, sitio y demás factores ambientales, cuyos resultados en función de los datos de la Tabla 2, se muestran en la Figura 14.

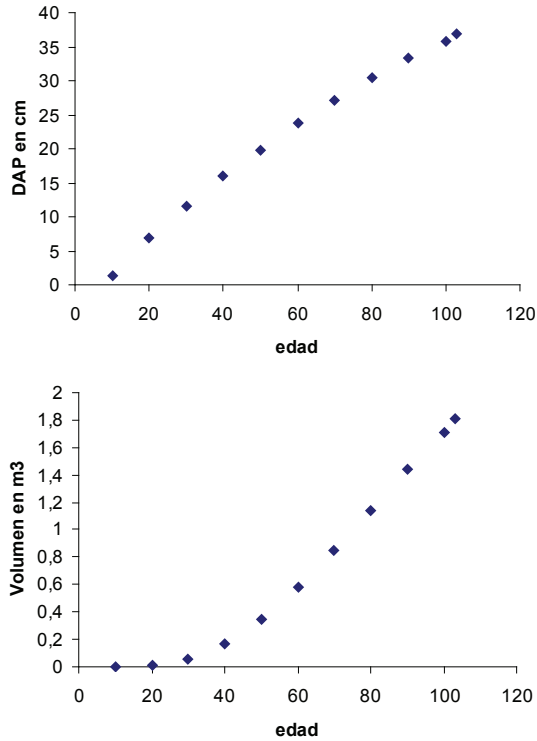


Figura 14. Curva de crecimiento, según dos variables, de un mismo rodal

Así, el crecimiento de un árbol puede presentar variaciones en sus dimensiones de altura, diámetro, volumen, área basimétrica y peso, en función de diversos factores que no siempre pueden ser controlados o monitoreados, como los factores genéticos de las especies y sus interacciones con el medio ambiente. Otras fuentes de influencia directa en el crecimiento son los factores climáticos (temperatura, precipitación, viento, insolación y otros), pedológicos (características físicas, químicas y biológicas de los suelos), topográficos (inclinación, altitud y exposición del sitio), biológicos (plagas y enfermedades) y por la propia competencia con otros árboles y otros tipos de vegetación. También deben considerarse otros factores derivados de acciones antrópicas (deforestaciones, incendios y otros).

4.1 Crecimiento en altura

El crecimiento en altura se produce por la actividad de la yema apical o terminal, a través de la división celular. Este crecimiento es también llamado de crecimiento primario. Esta variable, altura del árbol, produce la modificación más notoria del crecimiento, especialmente en la edad juvenil en que es fácil observar la rapidez de la modificación de la altura en períodos cortos de tiempo.

El crecimiento en altura es evaluado midiendo las alturas al inicio y al final de un intervalo de tiempo definido. En algunos árboles, donde es posible realizar el análisis del tronco, se pueden determinar los correspondientes valores e índices de crecimiento en altura. Para algunos árboles tropicales existen registros bibliográficos que señalan que el crecimiento en altura para varias especies se produce con un incremento de hasta 1 metro para cada centímetro de DAP, correspondiente a la edad juvenil del árbol. Figura 15. Cuando los árboles adquieren más de 40 a 50 cm de DAP, el incremento en altura disminuye aproximadamente a 0,5 m por cada cm de DAP, evidenciando que el árbol se encuentra probablemente en la fase madura de crecimiento. En árboles adultos el crecimiento en altura tiende a estabilizarse hasta llegar a ser nulo, mientras el DAP continua creciendo.

Esta relación de las variables alturas y DAP es muy importante porque es a través de ella que se puede predecir el ingreso de los árboles en las diferentes clases diamétricas usadas en los correspondientes planes de ordenación forestal.

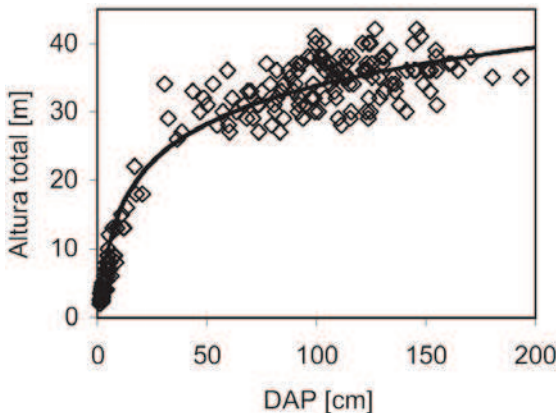


Figura 15. Relación del crecimiento en altura y DAP. Fuente: Zuidema y Boot, 2002

4.2 Crecimiento en diámetro

El crecimiento en diámetro se refiere al aumento del diámetro de un árbol en un determinado período de tiempo. Este crecimiento es también denominado de crecimiento secundario. Generalmente primero el árbol crece en altura y después en diámetro. Este crecimiento es influenciado principalmente por su distribución espacial y por los mismos factores señalados en el crecimiento en altura.

El crecimiento en diámetro está influenciado directamente por la actividad del cambium. Por esta razón es posible registrar el crecimiento correspondiente de un día o a veces será necesario establecer el respectivo crecimiento por tiempos más cortos, por ejemplo, desde la salida hasta la puesta del sol, o intervalos de tiempo más prolongados, como semanas, meses y años. Para los propósitos de la ordenación forestal, generalmente se efectúan mediciones cada año o a intervalos de tres a cinco años; sin embargo, de acuerdo con los objetivos de la investigación las mediciones pueden ser realizadas en intervalos más cortos o más largos.

El crecimiento en diámetro no es igual a lo largo del árbol. Para evaluarlo se emplea generalmente la variable DAP al inicio y al final del período requerido. Los árboles adultos de las zonas tropicales, generalmente presentan índices de crecimiento en diámetro bastante bajos, entre 1 y 2 mm por año (Brienen y Zuidema, 2003).

4.2.1 Instrumentos para medir el crecimiento en diámetro

a) Fitotensiómetro.

Los fitotensiómetros son instrumentos fabricados para realizar estudios ecofisiológicos, permitiendo obtener mediciones de la expansión y dilatación del tronco de los árboles. De manera artesanal se puede construir el instrumento utilizando un tubo de ensayo o pipeta graduada y un pequeño recipiente de plástico (Figura 16), fijado este último en el tronco con una cinta metálica.

Una vez fijo en el tronco, el recipiente de plástico se llena con un líquido coloreado para visualizar mejor el movimiento del líquido en la pipeta graduada. Se calibra la presión inicial de la cinta metálica sobre el recipiente plástico de modo que el menisco de la pipeta coincida con un valor conocido, considerado el punto cero.



Figura 16. Fitotensiómetro

El crecimiento diametral del tronco, equivalente a la actividad cambial del árbol, hace que exista mayor presión sobre la cinta metálica que rodea el recipiente de plástico, permitiendo obtener las mediciones correspondientes por medio del movimiento del líquido colorido dentro del tubo de ensayo o pipeta graduada. El valor del crecimiento se obtiene por la diferencia entre los valores registrados (inicial y final) en la pipeta o tubo de ensayo.

b) **DialDendro**

Es un instrumento construido para realizar mediciones periódicas del crecimiento diamétrico en intervalos de tiempo definidos por el investigador. Se compone básicamente de una escala de nonios (Figura 17) y un resorte metálico localizado lateralmente en el interior de la caja de soporte.

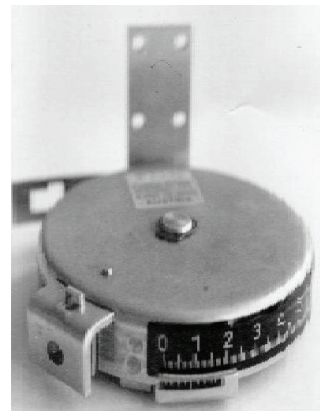


Figura 17. Dial-Dendro.

Fuente: www.relakoptechnik.com

Dependiendo de la dimensión de la circunferencia del tronco a ser medido, se pueden utilizar varias bandas metálicas de 300 o 900 mm de largo en un sistema de encaje, que acompañan el instrumento. El principio de medición se fundamenta en la expansión del resorte a cada aumento del crecimiento diamétrico del tronco. La escala de medición está preparada para registrar cambios o incrementos de la circunferencia del tronco a partir de 80 mm. Entre una medición y otra se puede determinar el crecimiento diamétrico correspondiente en una forma mucho precisa (Imaña, 1994).

c) **Microdendrómetro**

Es un instrumento diseñado para medir las variaciones del diámetro en períodos relativamente cortos (horas, días, semanas o meses) (Figura 18). Adosado a un instrumento registrador, se convierte en un microdendrógrafo, capaz de registrar gráficamente el crecimiento diamétrico.

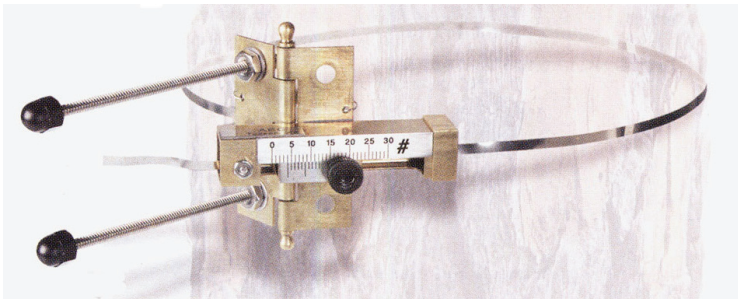


Figura 18. Microdendrómetro

Al realizar minuciosas mediciones de crecimiento en diámetro, por medio de cualquiera de los instrumentos descritos, existe la posibilidad de analizar el crecimiento en área basimétrica, con un mínimo de error, puesto que incorpora en su procedimiento de cálculo sólo la variable DAP.

Es posible la combinación de técnicas y uso de equipos variados; en Venezuela, en la Reserva Forestal de Caparo en el año 1978, se utilizaron dendrómetros y análisis de los anillos de crecimiento en los tarugos obtenidos con barreno de Pressler y en discos a diversas alturas, de árboles derribados. Los dendrómetros se fijaron en 29 árboles y se tomaron mediciones cada mes durante siete meses, con exactitud de 0,1 mm (Worbes, 1999).

4.3 Crecimiento en área basimétrica

El crecimiento en área basimétrica es evaluado en función de la medición del diámetro. Un crecimiento constante por año del área basimétrica significa que el crecimiento diamétrico viene disminuyendo. Para calcular el crecimiento del área basimétrica (C_{AB}) se puede emplear la siguiente expresión matemática:

$$C_{AB} = \frac{\pi}{4} \cdot 2 \cdot DAP \cdot I$$

donde:

I = crecimiento diamétrico

4.4 Crecimiento en volumen

El crecimiento en volumen se refiere al aumento del volumen en un determinado período de tiempo y como en los casos anteriores, se evalúa calculando la diferencia de los volúmenes que el árbol tuvo al inicio y al final del período (n) correspondiente:

$$C_V = \frac{V_f - V_i}{n}$$

donde:

C_V = crecimiento en volumen

V_f = volumen final

V_i = volumen inicial

n = años

El crecimiento en volumen es el resultado de los crecimientos del diámetro y de la altura, y depende de la forma del tronco. Por este motivo el cálculo de los volúmenes iniciales y finales se efectúa con base de las mediciones iniciales y finales de las variables citadas.

Si la medición se realiza en períodos muy cortos, se considera que las variables altura y factor de forma pueden mantenerse constantes, y el crecimiento del volumen puede ser calculado con la fórmula:

$$C_v = \frac{\pi}{4} \cdot f \cdot h \cdot (D_f^2 - D_i^2)$$

donde:

C_v = crecimiento en volumen

f = forma

h = altura

D_f = diámetro final

D_i = diámetro inicial

$\pi = 3,1416$

El crecimiento en volumen está influenciado por los mismos factores mencionados para el crecimiento en altura y principalmente por la densidad del bosque. Los rodales forestales con mayor densidad de árboles por superficie, que presentan mayores valores medios de diámetro y área basimétrica individual, resultan en menor producción que los bosques con menor densidad. Esto ocurre debido al mayor número de árboles por unidad de área (Scolforo, 1994).

Las intervenciones silviculturales (por ejemplo, raleos, podas o desramas) también pueden influir en la producción forestal, estimulando el crecimiento en volumen cuándo son aplicadas con la intensidad correcta.

Se logran estimaciones más precisa del crecimiento volumétrico cuando se utilizan tablas de volumen. Una tabla de volumen no es nada más que una relación numérica en forma tabular, capaz de estimar el volumen total o parcial de un árbol a partir de variables dendrométricas independientes y de fácil obtención como diámetros y alturas (Finger, 1992). Las tablas que consideran diámetro, altura y la función de forma del tronco ofrecen valores más aproximados que aquellos de una o dos entradas solamente, por ejemplo el diámetro o diámetro - altura.

4.5 Crecimiento relativo

Para calcular el crecimiento relativo o en porcentaje, se considera al árbol como si fuese un capital que crece debido a los intereses (incrementos de las variables dendrométricas). En este sentido, el crecimiento puede ser evaluado a través de las fórmulas de interés simple y de interés compuesto.

Usualmente se usan las fórmulas del interés simple, o del interés compuesto, utilizando la variable volumen (Prodan, 1965, Prodan *et al.*, 1997):

$$I_s (\%) = \left[\frac{(V_f - V_i)}{n \cdot V_f} \right] \cdot 100$$

donde:

I_s = % del incremento anual en base del V_i (% del interés simple)

V_i = volumen al inicio del periodo (capital inicial)

V_f = volumen al final del periodo (capital final)

n = número de años del período (tiempo)

$$I_C (\%) = \left(\sqrt[n]{\frac{V_f}{V_i}} - 1 \right) \cdot 100$$

donde:

I_C = % del incremento o crecimiento anual (interés compuesto).

La fórmula del interés compuesto ofrece una muy buena estimación, en porcentaje del incremento anual, sobre todo en la etapa juvenil del árbol, cuándo este crece con más rapidez.

Existen otras fórmulas que permiten evaluar el crecimiento volumétrico en porcentaje (P_v), siendo las más conocidas las siguientes:

Fórmula de Pressler

$$P_v = \left(\frac{V_f - V_i}{V_f + V_i} \right) \cdot \frac{200}{n}$$

P_v = % del crecimiento volumétrico

Fórmula de Kunze

$$P_v = \frac{(V_f - V_i) \cdot 200}{V_f(n-1) + V_i(n+1)}$$

P_v = % del crecimiento del volumen medio $(V_i + V_f)/n$

Fórmula de Breymann

$$P_V = \frac{(V_f - V_i)}{n \cdot V_f} \cdot 100$$

P_V = % del crecimiento volumétrico

Breymann, ingeniero forestal austriaco, publicó en 1868 la fórmula de cálculo arriba indicada, fórmula matemática que posteriormente fue adoptada en las ciencias económica y social para el cálculo clásico de los intereses compuestos, considerándola una de las grandes contribuciones que la ingeniería forestal dio a la moderna área de la matemática financiera.

Cuándo los árboles presentan anillos de crecimiento bien visibles, es posible efectuar la medición del crecimiento en diámetro para un periodo determinado de años, contando el número de anillos, como visto anteriormente. En base a la información proveniente del número de anillos de crecimiento se puede calcular el porcentaje del incremento anual del área basimétrica a través de las siguientes fórmulas:

Fórmula de Pressler

$$P_{AB} = \frac{400}{n} \left(\frac{D_f - D_i}{D_f + D_i} \right)$$

Fórmula de Schneider

$$P_{AB} = \frac{400}{r \cdot D_f}$$

Fórmula de Borggreve

$$P_{AB} = \frac{100 \cdot (4/n) \cdot D}{D^2}$$

Fórmula de Wahleberg

$$P_{AB} = \frac{40 \cdot K}{D_f}$$

Fórmula de Jonson

$$P_{AB} = \frac{100}{n} \left(1 - \frac{D_i^2}{D_f^2} \right)$$

donde:

P_{AB} = % del crecimiento de la área basimétrica

D = DAP sin corteza en cm

D_i = diámetro sin corteza al inicio del periodo

D_f = diámetro sin corteza al final del periodo

n = número de años del periodo

r = número de anillos en el último centímetro

K = longitud radial en cm de los últimos 10 anillos.

4.6 Funciones de crecimiento

Conforme fue expuesto anteriormente, el crecimiento es fundamentalmente una función del tiempo, por tanto presenta las siguientes características (Guimarães y Castro, 1986):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W = \alpha$$

Al tener un punto de inflexión expresado por el parámetro γ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W = A$$

donde:

W = crecimiento

α = dimensión inicial

t = tiempo

A = dimensión en la madurez

Se propusieron varios modelos matemáticos (Finger, 1992; Scolforo, 1994) que fueron sometidos a contraste experimental para intentar explicar e interpretar las diversas tendencias de las curvas del crecimiento. Algunos de esos modelos fueron derivados de la curva $(1 \pm Ae^{-kt})^\gamma$.

Los principales modelos paramétricos ajustados son (Guimarães y Castro, 1986, Scolforo, 1994):

Función logística

$$W = \frac{A}{1 + be^{-kt}}$$

Función de Gompertz

$$W = Ae^{-be^{-kt}}$$

Función de Richards

$$W = A(1 - be^{-kt})^\gamma$$

donde:

W = crecimiento

A = valor asintótico de la variable que puede ser atingido

b = parámetro de posición en el tiempo cero

k = tasa o constante de crecimiento

t = tiempo

e = exponente

4.7 Crecimiento de los rodales

Al igual del crecimiento de los árboles, para la planificación del manejo de los rodales es importante conocer el crecimiento de la masa boscosa. Las curvas de crecimiento de los rodales mantienen comportamientos similares a la de los árboles, presentando inherentes diferencias acentuadas en sus diversas fases de desarrollo.

En el caso de considerar rodales se debe tomar en cuenta que naturalmente existen pérdidas de la masa, muchas veces ocasionada por la muerte natural de los árboles. En ese sentido el crecimiento de los rodales se clasifica en:

- a) **Crecimiento neto de la masa principal**
Donde se supone que se trata de un bosque heterogéneo donde una o algunas especies tienen un mayor valor económico o silvicultural. El crecimiento neto de la masa principal estará definido por la diferencia entre el volumen o el área basimétrica entre dos inventarios sucesivos. Es la diferencia que podrá existir en la masa boscosa principal.
- b) **Crecimiento neto total del macizo forestal**
Considera los mismos principios del crecimiento neto de la masa principal, incluyendo todo el volumen o el área basimétrica del total de las especies que en ella habitan.
- c) **Crecimiento bruto**
Cuándo se refiere al crecimiento neto adicionando el volumen o el área basimétrica de los árboles muertos o ya extraídos.
- d) **Crecimiento aparente**
Corresponde a la masa que en un primer inventario no fue considerado por no haber alcanzado los valores mínimos establecidos para la explotación correspondiente. En un segundo inventario consecutivo (n años más tarde) esa masa, definida normalmente como “ingreso de masa”, podrá ser registrada una vez que los individuos arbóreos correspondientes muestren poseer el valor mínimo de las variables dendrométricas exigidas. La diferencia en volumen o en área basimétrica de esos dos inventarios característicos es lo que se denomina crecimiento aparente.
- e) **Crecimiento máximo**
Es lo que se identifica como la explotación absoluta, aquella que objetiva la máxima producción maderera por unidad de área. Considerando las curvas de incrementos, este crecimiento corresponde a lo que se llama punto de corte o rotación comercial.

5

Predicción del crecimiento

Una de las principales finalidades de la medición del crecimiento consiste en presentar informaciones sobre la producción presente y futura de los árboles o de rodales forestales y bosques nativos, por medio de la predicción del crecimiento, principalmente del volumétrico. Esta predicción está más relacionada al crecimiento de rodales forestales que a los árboles individuales. Por cierto que el crecimiento de los rodales es una aplicación directa del crecimiento de los árboles individuales.

La predicción del crecimiento está fundamentada en uno de los tres principios siguientes:

1. **Igualando el crecimiento del pasado con el crecimiento del futuro.** De acuerdo con este principio la previsión del crecimiento para un período futuro debe ser considerada igual a lo acumulado del crecimiento de un período igual al ocurrido anteriormente (Figura 17).

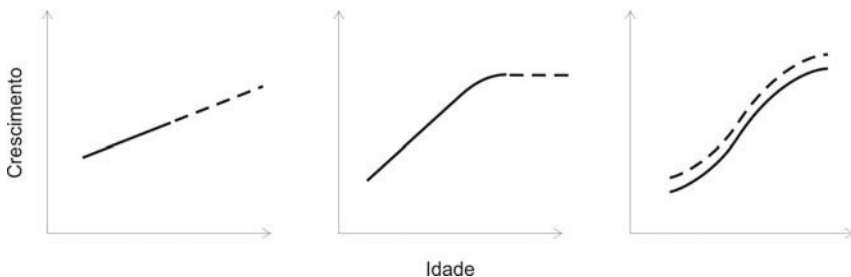


Figura 19. Curvas de crecimiento acumulado y de predicción. Fuente: Imaña *et al.*, 2005

En la Figura 19-A, el crecimiento previsto está representado por la línea apuntillada. Una extrapolación lineal puede producir una sobre estimación para muchas variables del crecimiento, puesto que el crecimiento natural tiende a desacelerar con la edad. Este principio es válido principalmente para predicciones del área basimétrica. El crecimiento en área basimétrica continúa a una tasa constante durante la mayor parte de la vida del árbol. Se puede obtener una estimación del área basimétrica futura extrapolando linealmente el área basimétrica o el cuadrado del diámetro considerado.

La predicción del crecimiento del volumen también se puede hacer en base al porcentaje del crecimiento anual, presumiéndose que el árbol crecerá en la misma proporción durante todo el tiempo.

2. **Prolongando la curva de tendencia del crecimiento pasado.**

Según este principio (Figura 19-B) se asume una tendencia de crecimiento de los árboles, partiendo de que tienen un ritmo fijo de crecimiento. Este principio es válido únicamente para determinadas etapas del crecimiento del árbol a lo largo de las fases de su vida: juvenil, madura y senil.

3. **Comparando los datos de un corto período con los existentes para los largos períodos, de árboles similares en condiciones ambientales semejantes.**

Este principio tiene una base mucho más científica que los métodos anteriores, pues presenta resultados más confiables y precisos (Figura 19-C). En este caso se toma un mayor número representativo de observaciones en un amplio periodo de tiempo. Sin embargo, deben realizarse continuamente ajustes a determinadas circunstancias, especialmente con algunas prácticas silviculturales.

Sin embargo, es muy peligroso efectuar cualquiera de las predicciones del crecimiento si solo se parte de las observaciones anteriores, por las siguientes razones:

El crecimiento depende de varios factores, y no es seguro que en el futuro continuarán iguales. El tiempo al cual se desea extender la predicción debe ser corto, pues si se extiende más, mayor será la inseguridad. Se necesita disponer de un número suficiente de mediciones

sobre el crecimiento de los árboles en el pasado. Este es un procedimiento relativamente fácil en árboles que presentan anillos de crecimiento bien visibles. Caso contrario se debe efectuar mediciones periódicas en parcelas permanentes hasta disponer de un número adecuado de datos. Cuanto menor es el número de datos, menor será la exactitud de la predicción.

6

Incremento

El crecimiento de cualquier variable dendrométrica puede ser evaluado de acuerdo a las modificaciones producidas generalmente en los crecimientos acumulados a lo largo del tiempo. A esa característica es que se denomina incremento, o sea, es la manera de expresar el crecimiento de las variables dendrométricas en función del tiempo. El volumen del fuste es el mejor parámetro para expresar el crecimiento de un rodal. En árboles individuales normalmente se procura conocer el crecimiento en diámetro o en área basimétrica. Consecuentemente la intensidad del crecimiento se traduce en términos de crecimientos que las variables consideradas tienen durante un determinado periodo. Por tanto, se debe definir el tipo de crecimientos que se pretende manejar, a fin de interpretar el fenómeno que se pueda producir (Bruce y Schumacher, 1950).

El incremento puede ser definido como el crecimiento del árbol o de un rodal forestal en un determinado periodo. Este periodo puede ser expresado en días, meses, años o décadas. Así por ejemplo, los crecimientos anuales (i) de una variable dendrométrica (y) entre un año (t) y el año siguiente ($t+1$) están dados por la expresión de los crecimientos anuales (a_a)

$$a_a = y_{t+1} - y_t$$

Cuando $t = 1$ los crecimientos anuales o corrientes resultan ser el aumento que ocurre durante un año.

Si el periodo considerado fuese de (n) años se tienen los crecimientos periódicos o corrientes (a_c):

$$a_c = y_{t+n} - y_t$$

Si el periodo considerado es mayor a un año, éste se expresa como crecimientos del periodo. Si el crecimiento acumulado se divide entre los años pertinentes (edad del árbol, del bosque o del rodal forestal) el valor medio de la variable se traduce en crecimiento medio anual (a_{ca}):

$$a_{ca} = \frac{y_{t+1} - y_t}{n}$$

Ese crecimiento o incremento puede ser obtenido para las variables dendrométricas diámetro, altura, volumen y área basimétrica. En la práctica dasométrica la variable más utilizada es el volumen. De esta forma la producción de un árbol o del bosque en su totalidad es evaluada en base al crecimiento en función del tiempo, o sea del incremento volumétrico, considerando incluso los factores genéticos y ambientales locales (calidad del sitio).

6.1 Incremento Corriente Anual

Expresa el crecimiento ocurrido entre el inicio y el final de la estación de crecimiento, en un período de 12 meses, o entre dos años consecutivos. Este crecimiento también es conocido como crecimiento acumulado, incremento corriente anual (ICA) o simplemente como incremento anual (IA), correspondiendo a lo que el árbol creció en el periodo de un año.

$$ICA = Y_{(t+1)} - Y_{(t)}$$

donde:

ICA = incremento corriente anual

Y = dimensión de la variable considerada

t = edad

6.2 Incremento Periódico

Expresa el crecimiento en un período de tiempo determinado.

$$IP = Y_{(t+n)} - Y_t$$

donde:

IP = incremento periódico

Y = dimensión considerada

t = edad

n = período de tiempo

cuándo n = 1, entonces IP = ICA

6.3 Incremento Medio Anual

El valor del incremento o crecimiento medio anual (IMA) expresa la media del crecimiento total a cierta edad del árbol. Expresa por tanto la media anual del crecimiento para cualquier edad.

El IMA es obtenido por la división del mayor valor actual de la variable considerada, dividida por la edad a partir del tiempo cero.

$$IMA = Y_t / t_o$$

donde:

IMA = incremento medio anual

t_o = edad a partir del tiempo cero

Y = dimensión de la variable considerada

Así, para el caso del volumen:

$$IMA = \frac{\text{volumen del árbol}}{\text{edad}}$$

6.4 Incremento Periódico Anual

El incremento o crecimiento periódico anual (IPA) corresponde a lo que el árbol creció en promedio en un determinado periodo de años, por ejemplo, lo que el árbol creció en 5, 10 o 15 años. El cálculo se realiza considerando los valores del inicio y al final del periodo y el número de años.

Para determinadas especies arbóreas la velocidad del crecimiento es bastante lenta, lo que torna difícil medir el incremento por cortos períodos de tiempo. Este fenómeno es típico de las especies de clima templado, que debido a las bajas temperaturas en la estación de invierno, tienen sus tasas de crecimiento bastante reducidas. También puede acontecer con especies en rodales inequianeos, lo mismo que en climas tropicales. Esto ocurre en función de su grupo ecológico o grupo funcional, o puede deberse a las condiciones de competencia en ese tipo de comunidad forestal, además de otros factores que pueden afectar el crecimiento, llevando a esas especies a presentar tasas de crecimiento reducidas.

En tales situaciones es razonable expresar el crecimiento anual por la media del crecimiento en un determinado periodo de años.

$$IPA = (Y_{(t+n)} - Y_t)/n$$

donde:

Y = dimensión de la variable considerada

t = edad

n = periodo de tiempo

Por ejemplo, en el caso del volumen:

$$IPA = \frac{\text{volumen}_{em2004} - \text{volumen}_{em1994}}{10 \text{ años}}$$

Si se consideran los factores genéticos y ambientales como constantes, las curvas de crecimiento se pueden obtener en función de la edad. La tendencia de la curva del crecimiento anual o incremento (IA) es del tipo sigmoideal (curva en “S”), mostrando el crecimiento acumulado hasta una cierta edad (Figura 20).

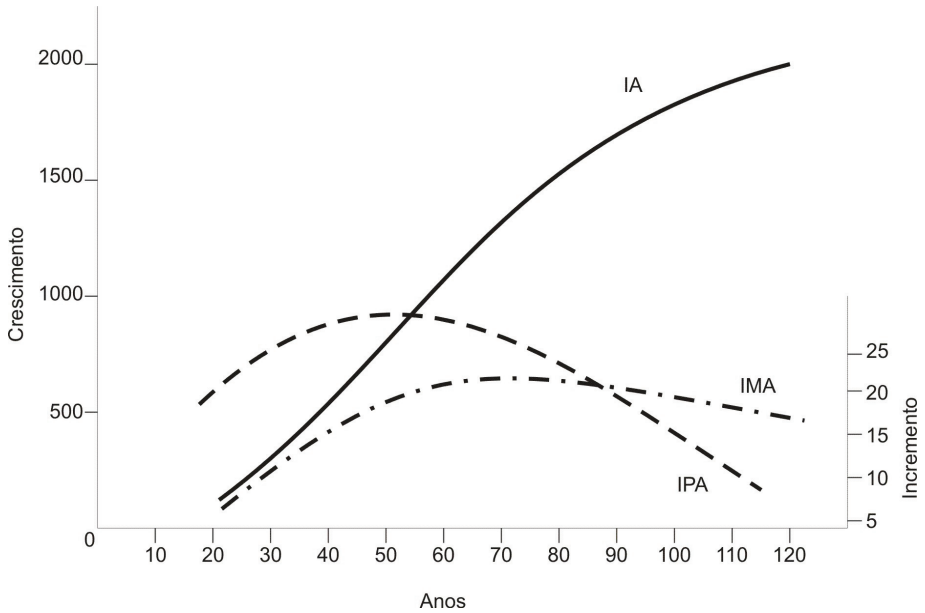


Figura 20. Curvas típicas del crecimiento e incrementos

El incremento periódico anual (IPA) presenta su valor máximo antes que el incremento medio anual (IMA), y antes de que ambas curvas declinen su tendencia (Figura 20). El cruce de la curva del IPA con la del IMA determina la edad de rotación comercial del rodal forestal.

6.5 Análisis del Crecimiento y de los Incrementos

El crecimiento de los árboles, y consecuentemente de los bosques, está íntimamente asociado al factor tiempo y a las condiciones ambientales del sitio. Cuándo las condiciones ambientales (características edáficas y climáticas) son favorables al desarrollo de los árboles, estos expresan su máxima capacidad de crecimiento. En este caso, la curva de crecimiento presenta el comportamiento típico alcanzado en cada una de las fases del crecimiento del árbol y las típicas variaciones en el ritmo de crecimiento para cada una de ellas.

Analizando la curva de crecimiento es posible identificar nítidamente tres fases bien definidas: fase juvenil, fase madura y fase senil. La identificación de esas fases en el gráfico se hace en base de los puntos de inflexión de la curva, o sea, cuándo hay una modificación en el ritmo del crecimiento.

Tomando como base los datos del crecimiento y de los incrementos de la Tabla 3, es posible construir un gráfico (Figura 21) y comparar el comportamiento de los incrementos medio anual (IMA) y periódico anual (IPA); análogamente, cuándo también se considera el crecimiento corriente anual (IA), si las evaluaciones hubieran sido realizadas anualmente. A partir de las curvas de tendencia de esos incrementos es posible planificar en mejor forma cómo conducir el bosque, con vista al manejo de la producción forestal.

Tabla 3. Datos del crecimiento e incrementos de volumen

Edad (años)	PMC (años)	Densidad (n/ha)	IA (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha)	IPA (m ³ /ha)
5		4200	33	6,6	
	7,5				17,2
10		3300	119	11,9	
	12,5				31,0
15		2380	274	18,27	
	17,5				25,4
20		1415	401	20,05	
	22,5				13,4
25		850	468	18,72	
	27,5				5,6
30		610	496	16,53	
	32,5				3,0
35		490	511	14,60	
	37,5				1,4
40		425	518	12,95	
	42,5				0,8
45		420	522	11,60	
	47,5				0,2
50		415	523	10,46	

PMC = punto medio de la clase de edad, IA = crecimiento corriente anual, IMA = incremento medio anual, IPA = incremento periódico anual

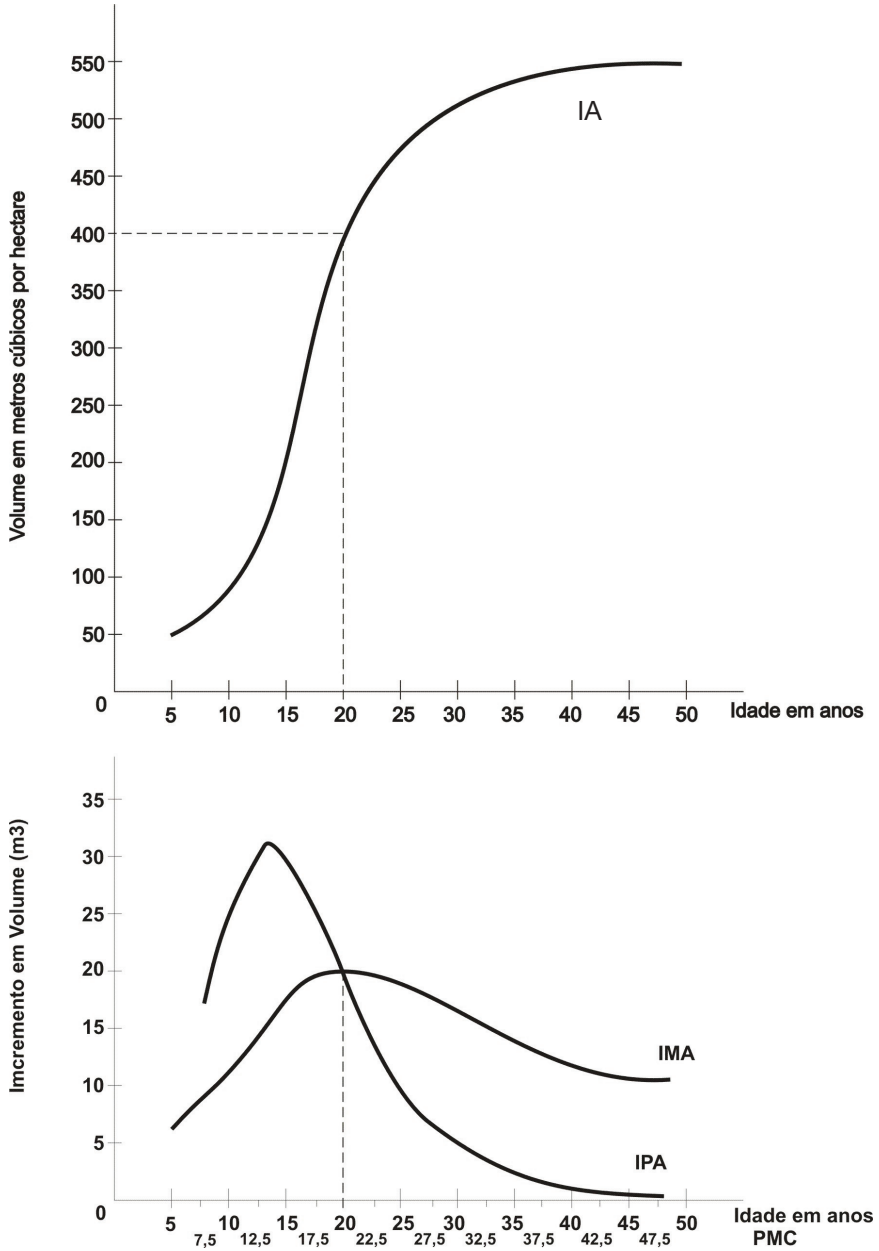


Figura 21. Curvas de tendencias del incremento anual (IA), incremento medio anual (IMA) e incremento periódico anual (IPA). Fuente: Imaña *et al.*, 2005

Cuándo el IMA alcanza su máximo valor, se define en los sistemas de manejo forestal como el mejor momento, desde el punto de vista silvicultural, para poder intervenir en los rodales a través de raleos o cortas de explotación. El máximo raleo se alcanza en el momento en que se consigue el mayor crecimiento, por el menor número de árboles. En ese sentido se diferencian raleos cuantitativos y raleos cualitativos, que naturalmente deben ser extraídos de las curvas de crecimiento.

Cuándo el IPA es mayor que el IMA es señal que el IMA está creciendo; por otro lado, cuándo el IPA es menor que el IMA significa que el IMA está decreciendo. De esta forma el punto de intersección del IMA/IPA indica el punto con el valor máximo de producción forestal por unidad de área. Este valor se encuentra cuándo ese punto de intersección se proyecta en la curva del IA.

En el caso de la Tabla 3, la edad de máximo incremento medio anual fue obtenida en el vigésimo año, indicando así la edad óptima de rotación técnica del rodal, también conocido como rotación comercial, momento en que debe ser procesada la explotación forestal. Cuándo en esa edad los árboles del rodal no alcanzaron aún el diámetro mínimo deseado o establecido, en función del destino a la que se desea la producción forestal, se debe proceder con la aplicación de alguna acción silvicultural (raleo, poda, fertilización del terreno u otro), para que el rodal retome el crecimiento y los individuos arbóreos puedan ingresar en la correspondiente explotación forestal.

El análisis de crecimiento también se puede realizar por medio de las diversas variables dendrométricas. La variable altura en muchos casos es la variable más fácil de obtener y se caracteriza por simplificar bastante los procesos de cálculo, ofreciendo resultados muy consistentes. En la tabla 4 se reproducen datos de altura total colectados de un roble de 150 años de edad (Prodan, 1965). De los datos de la Tabla 4 fueron elaboradas las curvas pertinentes de crecimiento que se muestran en la Figura 22.

Tabla 4. Crecimiento en altura de un roble

edad	H (m)	IMA	IPA
10	0,2	0,02	0,020
15	0,9	0,14	0,060
20	2,7	0,36	0,135
25	5,1	0,48	0,204
30	7,2	0,42	0,240
35	8,8	0,32	0,252
40	10,2	0,28	0,255
50	12,7	0,25	0,254
60	15,0	0,23	0,250
70	16,9	0,19	0,241
80	18,5	0,16	0,231
90	19,6	0,11	0,218
100	20,6	0,10	0,206
110	21,4	0,08	0,194
120	22,0	0,06	0,183
130	22,5	0,05	0,173
140	23,1	0,06	0,165
150	23,6	0,05	0,157

Fuente: Prodan 1965.

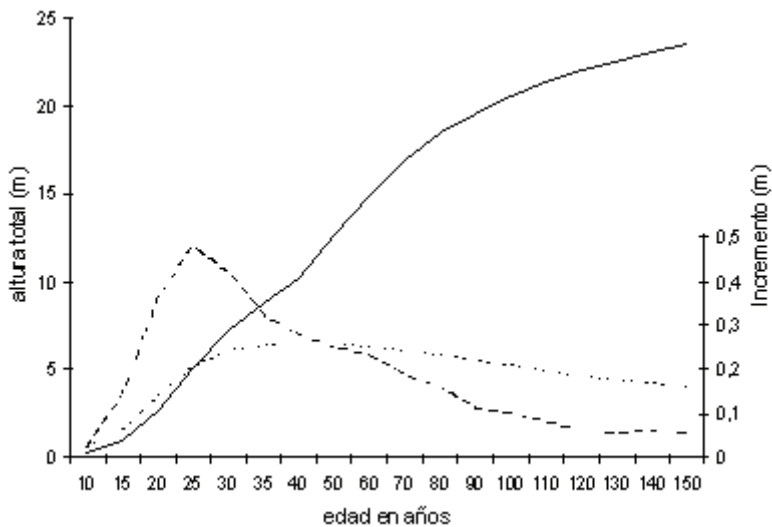


Figura 22. Curvas de incremento en altura

7

Modelos de producción y crecimiento

Es evidente la existencia de una correlación biológica y matemática entre parámetros del crecimiento y la correspondiente productividad, ya sea maderera o de cualquier otra índole biológica. Entre esas correlaciones, se han ensayado modelos de producción y crecimientos estructurados en procesos de integración de modelos de crecimiento. El crecimiento se representado por:

$$\frac{dY}{dt} = f(t)$$

y la producción (Y) entre dos edades por t_0 e t por:

$$Y = \int_{t_0}^t f(t) \cdot dt$$

Por tanto, la producción acumulada hasta la edad “t” será:

$$Y = f(t) + C$$

Con base en este procedimiento fue creada la función acumulativa del crecimiento, o función de producción, con la siguiente expresión matemática:

$$d(t) = \frac{1}{f(Y)} \cdot dY$$

$$t = \int \frac{1}{f(Y)} \cdot dY + c = G(Y)$$

donde:

Y = producción

t = tiempo

c = condición inicial determinado a partir de la producción Y_0 en el instante t_0

Se observa que la compatibilidad entre el crecimiento y la producción es muy importante en la modelación matemática del crecimiento y de la producción de rodales forestales, siendo la compatibilidad una de las características más deseables en la creación de modelos de producción forestal.

Bibliografía

- Aniol, R. 1991. *Computer Aided Tree Rings Analysis. System, User Manual*. Schleswig, F. Germany.
- Botosso, P. C. y Mattos, P. P. de. 2002. *Conhecer a idade das árvores: importância e aplicação*. Colombo: EMBRAPA, Brasil. 25 p. (série Documentos, 75)
- Brienen, R.; Zuidema, P. 2003). *Anillos de crecimiento de árboles maderables en Bolivia: su potencial para el manejo de bosques y una guía metodológica*. Riberalta, Bolivia. PROMAB. 33p.
- Bruce, D.; Schumacher, F. X. 1950. *Forest mensuration*. MacGraw-Hill, New York. 483p.
- Chave, J. 2006. Medición de densidad de madera en árboles. Tropicales. Manual de campo. *Panamazonia* 7.
- Giménez, A. M.; Juárez de G., M.; Rios, N. A. 2005. Variabilidad de anillos de crecimiento em vinal (*Prosopis ruscifolia*). *Revista Forestal Venezolana* 49 (2): 197 – 203.
- Guimarães, D. P.; Castro, L. H. R. 1986. Análise de funções de crescimento. Planaltina, DF: EMBRAPA/CPAC. 21p. (Série: *Boletim de Pesquisa*, 29)
- Finger, C. A. G. 1992. *Fundamentos de biometria florestal*. Santa Maria: UFSM, CEPEF, FATEC. 269p.
- Imaña, J. 1994. Medições de crescimento com o Dial-Dendro. *Silvicultura* 15(5): 22-23.
- Imaña, J.; Silva, G. F. da; Tichetti, I. K. 2002. Variáveis dendrométricas. Brasília: Universidade de Brasília, Depto. Engenharia Florestal, 2002. 106p. (Série *Comunicações Técnicas Florestais* 4(1).

- Imaña, J.; Silva, G. F. da; Pinto, J. R. R. 2005. Idade e crescimento das árvores. Brasília: Universidade de Brasília, Depto. Engenharia Florestal. 40p. (série *Comunicações Técnicas Florestais* 7(1).
- Loján, L. 1996. *Una fórmula para estimar volúmenes en un bosque tropical húmedo*. Turrialba (Costa Rica) 16(1): 67-72.
- Mackay, E. 1964. *Dasometria, teoría y técnica de las mediciones forestales*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.
- Mariaux, A. 1967. Les cernes dans les bois tropicaux africains. Nature et Periodicité. *Revue Bois et Forêts Des Tropiques* (128): 39-54.
- Medawar, P. B. 1941. The laws of biological growth. *Nature* 148(3665): 772-774.
- Parde, J. 1961. *Dendrometrie*. Nancy, França: Imprimerie Louis-Jean. 351p.
- Prodan, M. 1965. *Holzmesslehre*. Frankfurt: Sauerlaender's Verlag. 644p.
- Prodan, M.; Peters, R.; Cox, F.; Real, P. 1997. *Mensura forestal*. San José-Costa Rica: GTZ-IICA. 586p.
- Scolforo, J. R. S. 1994. *Modelos para expressar o crescimento e a produção florestal*, parte 1. Lavras: ESAL, FAPE. 188p.
- Silva, J. A.; Paula Neto, F. 1979. *Princípios básicos de dendrometria*. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco. 185p.
- Souza, P. F. de. 1973. *Terminologia florestal, glossário de termos e expressões florestais*. Guanabara (RJ): Fundação IBGE. 304p.
- Tomazello Filho, M.; Botosso, P. C.; Lisi, C. S. 2001. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: Dendrocronologia e dendroclimatologia. In: Maia, N.B.; Martos, H.L.; Barella, W. (Org.) *Indicadores ambientais: conceitos e aplicações*. São Paulo, EDUC. p. 117-143.
- Vetter, R. E. 2000. Growth periodicity and age of Amazonian tree species. *Methods for their determination*. 1:135-156.
- Worbes, Martin. 1999. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology* (87): 391-403.
- Zuidema P. A.; Boot, R. G. A. 2002. Demography of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) in the Bolivian Amazon: impact of seed extraction on recruitment and population dynamics. *Journal of Tropical Ecology* v.18, p. 1-31.