

MODELO DE CRECIMIENTO DEL DIÁMETRO Y DEL VOLUMEN DE *Prioria copaifera* EMPLEANDO TÉCNICAS DENDROCRONOLÓGICAS

Jorge Andrés Giraldo Jiménez^a & Jorge Ignacio del Valle Arango^b

^a Ingeniero Forestal, Apartado Aéreo No 568, Medellín, Colombia; jagiral1@bt.unal.edu.co; estudiante de Maestría en Bosques y Conservación Ambiental, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

^b Profesor, Apartado Aéreo No 568, Medellín, Colombia; jidvalle@unal.edu.co; Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Departamento de Ciencias Forestales.

Los cativales han sido catalogados como una de las asociaciones vegetales más ricas del trópico en términos de biomasa. Sobresalen por conformar comunidades de varias especies de árboles entre las cuales el cativo (*P. copaifera* G.) es dominante. Este es un tipo de bosque especialmente importante en Colombia. Allí se encuentran los cativales más extensos existentes en América, su área original cubría 363.000 ha. hoy subsisten menos de 33.000 ha. Esta investigación se propone modelar el crecimiento del cativo tanto del diámetro (D) como del volumen aserrable, así como determinar la tasas absolutas (ICA) y medias (IMA) en función de la edad (t) empleando anillos de crecimiento. Demostramos la anualidad de los anillos de esta especie mediante dataciones con radiocarbono y mediante el cofechado. Modelamos el crecimiento del diámetro y el volumen con el modelo de von Bertalanffy. Estimamos el lapso vital del cativo en 614 años, tiempo requerido para que el diámetro alcance 99% del valor asintótico del diámetro obtenido con el modelo. La especie requiere 90 años para alcanzar 40 cm de D, diámetro de corta reglamentado en Colombia. Encontramos que el cativo alcanza el máximo ICA en D a los 40 años y en volumen a los 90 años con tasas de 0.5cm/año y 0.032m³/año por árbol. El máximo IMA se alcanza para el diámetro a los 80 años y para el volumen a los 140 años con tasas de crecimiento de 0.45cm/año y 0.018m³/año por árbol, respectivamente. Discutimos las ventajas de esta aproximación versus los la aproximación con parcelas permanentes. Aspiramos que esta información sea útil para el manejo sostenible de los bosques de cativo en Colombia.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, árboles tropicales, dendrocronología.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento sostenible de los ecosistemas forestales es un tema complejo que depende de factores sociales y políticos, pero, fundamentalmente, técnicos. En general se requieren datos de regeneración, estado sucesional, tasas de crecimiento y edad de los árboles (Shöngart 2008).

Colombia se caracteriza por ser un país tropical con grandes masas boscosas, entre ellas los cativales sobresalen por conformar comunidades de varias especies de árboles en las cuales el cativo (*Prioria copaifera* G.) es la especie dominante. Crece en las llanuras de desborde periódicamente inundables de los ríos Atrato y León, departamentos de Chocó y Antioquia. Allí se encuentran los cativales más extensos existentes en América, su área original cubría 360.000 ha. Durante más de 70 años ha sido la base de la industria maderera del Bajo Atrato, Chocó. Por su alta productividad y homogeneidad, uno de los bosques tropicales más fáciles de ordenar y manejar sosteniblemente. Los cativales se clasifican por su periodo de inundación: Tipo A1 el de mayor duración de la inundación (6-8 meses), allí la especie alcanza las mayores densidades de árboles por hectárea, Los tipo A2 y A3 presentan períodos de inundación de 3 a 6 meses y menor de 3 meses respectivamente.

El estudio del crecimiento es de gran importancia para ecólogos y forestales por cuanto permite conocer la dinámica de los bosques y estimar los turnos de aprovechamiento dentro de un bosque o rodal (Korning & Balslev 1994). El cativo ha sido estudiado por algunos investigadores, con el fin de estimar el crecimiento en diámetro como función de la edad, usando información proveniente de parcelas permanentes, (Grauel 2004; González 1991, 1995; del Valle 1979, 1986). Sin embargo, esta alternativa no es la mejor pues los datos obtenidos solo representan pequeños períodos de la vida de los árboles. En contraposición el uso de los anillos anuales de crecimiento, permiten obtener en una fracción del tiempo y a bajísimo costo las curvas de crecimiento reales que describen los árboles tropicales durante todo su lapso vital, evitando todos los sesgos de las parcelas permanentes (Brienen & Zuidema 2006).

La dendrocronología estudia los anillos de crecimiento de los árboles para extraer la señal ambiental contenida en ellos, pero también para estudiar su crecimiento (Roig 1987). Los anillos de crecimiento se definen como bandas de células producidas por el cámbium vascular en un período de tiempo (Kaennel & Schweingruber 1995). Fichler *et al.* (2003), encontraron especies con anillos anuales en un bosque húmedo tropical, sin meses ecológicamente secos, por cuanto sugieren que los estudios dendrocronológicos se pueden extender a todo el trópico sin excepción

Igual que muchos árboles tropicales el cativo forma anillos de crecimiento visibles a simple vista; McKenzie (1972) demostró su anualidad. Esta investigación tiene como objetivos demostrar la anualidad en el área de estudio de los anillos de crecimiento de *P. copaifera*, modelar su crecimiento tanto en diámetro como en volumen empleando sus anillos de crecimiento.

Métodos

Los árboles se muestrearon en un catival tipo A1, a 27 km al Sur-Este del municipio de Riosucio, (7°15'4.40" N, 76°58'42.39"O), 11 metros de altitud. La región presenta régimen de precipitación unimodal con aproximadamente 3529 mm anuales de precipitación. El clima es ecuatorial, pues no presenta meses ecológicamente secos (Figura 1).

Figura 1.

En el sitio de muestreo los grupos étnicos locales llevan a cabo extracciones legales de la especie. Circunstancia que permitió extraer 24 secciones transversales o discos de madera

Preparación de las muestras. Con el fin de resaltar mejor los anillos de crecimiento, las secciones se pulieron con lija de grano grueso (No 30) y disminuyendo gradualmente a grano fino (No 600). Luego se trazaron cuatro radios y se marcaron los anillos.

Obtención de datos. A cada sección transversal se le midieron los anillos siguiendo la dirección de los radios (previamente marcados) en una plataforma de medición Unislide TA 4020H1-S6 Velmex, con precisión de 0.001mm.

Análisis de radiocarbono. Para demostrar la anualidad de los anillos se empleó el llamado "efecto de las bombas nucleares" de la concentración de ^{14}C en el CO_2 atmosférico. Este es un marcador isotópico muy importante para datar la fecha de formación de productos orgánicos formados después de 1955 (Worbes & Junk 1989).

Cofechado, medición y ajuste de los anillos. Este proceso permitió realizar control de calidad de cada serie de crecimiento, eliminando los errores de medición. Para ello usó el *software* COFECHA. Puesto que el centro anatómico de los árboles no coincide con el centro geométrico, se aplicó una corrección por sesgos antes de convertir radios en diámetros. Ver Giraldo & del Valle 2011.

Modelación del crecimiento diamétrico.

Se obtuvo un conjunto de datos edad-diámetro (N=2654), se tomó una submuestra aleatoria representativa (n=240) y se ajustó el modelo de von Bertalanffy por su origen teórico, versatilidad y amplio uso en silvicultura. Luego calculamos el incremento corriente anual (ICA) y el incremento medio anual (IMA).

Validación: Para validar el modelo se tomó una muestra aleatoria de 50 pares de datos diámetro-edad diferentes de los 240 con los que se estimaron los parámetros del modelo y se aplicó una prueba de χ^2 con el fin de determinar si existían diferencias estadísticas entre los diámetros de esta muestra y los estimados con el modelo.

Lapso vital y tasa de crecimiento: El lapso vital se estimó calculando el tiempo requerido para que el diámetro de los árboles alcance 99% del valor asintótico. La tasa de crecimiento medio que involucra toda la forma de la curva fue calculada con el valor medio de una función (Giraldo & del Valle 2011)

Volumen aserrable: Con base en 1126 cativos cuyo volumen fue estimado por Romero (1965) se ajustó por mínimos cuadrados la función alométrica del volumen en función del diámetro, posteriormente se emplearon los mismos 240 diámetros previamente obtenidos aleatoriamente; pero ahora para estimar sus volúmenes. Estos, a su vez, se emplearon modelar el volumen en función de la edad. Nuevamente empleamos el modelo de von Bertalanffy y calculamos el IMA e ICA para el volumen.

RESULTADOS

Los anillos de crecimiento son visibles a simple vista en las secciones transversales pulidas; se observan definidos por líneas de parénquima marginal más claras que la madera de fondo. Los resultados del software COFECHA indican una correlación interserial de 0.476, significativa al 99% ($\alpha=0.01$).

Anualidad de los anillos de crecimiento:

La calibración con CALIBOMB indica que entre 91 y 99% de probabilidad de que los anillos datados con radiocarbono corresponden con el año predatado. Además la sincronización de los crecimientos máximos y mínimos durante más de 100 años y los resultados del cofechado, permiten afirmar que los anillos de crecimiento de *P. copaifera* son anuales (Giraldo & del Valle 2011).

Modelación del crecimiento diamétrico:

Después de seleccionar 240 pares de datos diámetro edad se obtuvo modelo de crecimiento diamétrico (D):

$$D = 102.748 \cdot (1 - e^{-(0.008)t})^{1.379}$$

EL modelo presentó un $R^2 = 0.93$. Se garantizó que el modelo estuviera exento de autocorrelación, independencia de los datos y los residuales homocedásticos. Las tasas ICA IMA Y D se presentan a continuación:

$$ICA = 1.103 \cdot (1 - e^{-(0.008)t})^{1.379} e^{-(0.008)t}$$

$$ICA = \frac{102.748 \cdot (1 - e^{-(0.008)t})^{1.379}}{t}$$

El ICA se maximiza cerca de los 40 años con 0.49cm/año. No obstante, a esta edad los árboles solo tienen 17cm de D. El máximo IMA se presenta a los 73 años, punto en el cual el ICA=IMA con tasas de 0.44cm/año. A esta edad el D es de 30.7cm (Figura 2). Empleando el valor medio de una función se encontró que la tasa media del ICA es 0.31cm/año. El lapso vital de la especie es 614 años

Figura 2.

En la validación del modelo de crecimiento diamétrico se encontró que los diámetros predichos no difieren significativamente de los observados con nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$). Lo cual valida el modelo.

Ecuación de volumen

Todos los estadísticos revelaron ajustes adecuados, el R^2 fue de 0.9248.

$$\ln(V) = -10.502 + 2.806\ln(D)$$

Antes de transformar la ecuación de forma logarítmica a su forma estándar se aplicó la corrección por sesgos descrita por (Zapata *et al.* 2001) la ecuación queda:

$$V = 2.814 \times 10^{-5} \cdot D^{2.806}$$

Modelo de crecimiento del volumen aserrable

Los 240 diámetros previamente obtenidos aleatoriamente fueron usados para estimar los valores de volumen, reemplazados en la ecuación de volumen anterior; estos permitieron estimar el modelo de crecimiento del volumen en función de la edad:

$$V = 3.23(1 - e^{-0.025t})^{9.765}$$

El ajuste del modelo resulto significativo estadísticamente ($R^2=0.99$), tal valor debe atribuirse a la corrección aplicada para corregir la heterocedasticidad (Giraldo & del Valle 2011). Los demás estadísticos del modelo son adecuados (Figura 3). Las siguientes ecuaciones corresponden a las tasas instantáneas y medias de incremento del volumen:

$$ICA = 0.810(1 - e^{-0.025t})^{8.765} \cdot e^{-0.025t}$$

$$IMA = \frac{3.23(1 - e^{-0.025t})^{9.765}}{t}$$

Figura 3.

El ICA alcanza el máximo valor los 90 años con $0.033\text{m}^3/\text{año}$ por árbol, A esta edad los árboles tienen 41cm de D. El IMA alcanza su máximo a los 143 años con $0.018\text{m}^3/\text{año}$ por árbol. A esta edad los árboles tienen 60cm de D, en este punto $\text{IMA}=\text{ICA}$ (Figura 3). El llamado turno biológico de los forestales o del máximo rendimiento sostenible anual del volumen es precisamente el punto donde se maximiza el IMA; esto es 143 años.

Al comparar los volúmenes aserrables predichos con los observados se encontró que no difieren estadísticamente. Este resultado valida estadísticamente el modelo.

DISCUSIÓN

La modelación del crecimiento del diámetro y el volumen de los árboles es una herramienta técnica indispensable en la ordenación y el manejo sostenible de los bosques por cuanto permiten determinar los turnos de corta, las dimensiones y la producción esperada así como el momento en que las tasas de crecimiento se maximizan (Schöngart 2008).

El crecimiento diamétrico del cativo ha sido estudiado en parcelas permanentes pero hasta ahora ningún autor reporta el crecimiento del volumen. Las tasas de crecimiento del D hasta 60 cm de todas las fuentes disponibles (del Valle 1979, 1986, Gonzáles *et al.* 1991, Gonzáles 1995, Condit *et al.* 1993a, 1995b, Grauel 1999, 2004), arrojan cifras entre 0.19 y $0.77\text{cm}/\text{año}$ con media de $0.41\text{cm}/\text{año}$, cercana a los $0.43\text{cm}/\text{año}$ de este estudio.

Las tasas de crecimiento del cativo no son, como podría pensarse, bajas cuando se comparan con las de otros árboles. Por ejemplo Manokaran & Swaine (1994) presentan los resultados de las tasas de crecimiento diamétrico de árboles de tres parcelas permanentes medidas durante 37, 36 y 13 años, que oscilan entre 0.25 y $0.30\text{cm}/\text{año}$, similares a las del cativo en esta investigación.

Condit *et al.* (1995a) encontraron que el lapso vital del cativo es 1100 años. Cálculo basado en la estimación de la tasa de mortalidad y el tiempo requerido para que sobreviva solo el 0.01% de una cohorte. Cuando se emplean los datos de la tasa intrínseca de mortalidad de Condit *et al.* (1995a) no para 0.01% sino para 1% los resultados son similares a los aquí encontrados: 614 años versus 760 años. Además, si los cálculos de lapso vital en este estudio no se basaran en 99% de la asíntota sino en 99.9%, se obtendrían 902 años, similares a los 1100 años de Condit *et al.* (1995a). Pareciera mejor emplear 99% de la asíntota por cuanto los resultados concuerdan con Worbes & Junk (1999) a quienes la lectura de anillos de crecimiento les sugieren edades máximas de 700 años para árboles de la Amazonia.

De los sesgos y errores existentes en las mediciones en parcelas permanentes dan cuenta estos ejemplos con cativo: con base en la curva media para los censos de 1982 y 1985 las proyecciones de Condit *et al.* (1995b) en la Isla Barro Colorado indican que el cativo requiere 130 años para pasar desde 1cm hasta 60cm de D. Con base en los mismos árboles pero para los censos de 1985 y

1990 el resultado fue de 180 años, 38.5% superior. En Panampa Grauel (1999) a partir de censos de parcelas hechos entre 1997 y 1998 reporta 310 años para que el cativo pase desde 10cm hasta 60cm de D; para el mismo sitio con censos de 1997 y 2001 solo requiere 200 años (Grauel 2004), 110 años menos.

La especie alcanza tasas de crecimiento promedias cuando se compara con otras especies tropicales. La información aquí presentada es muy importante en el manejo sostenible de los cativales existentes en su área de distribución que se extiende desde Costa Rica hasta el Darién colombiano.

BIBLIOGRAFÍA

- Brienen, R. & P.A. Zuidema. 2006. The use of tree rings in tropical forest management: Projecting timber yields of four Bolivian tree species. *Forest Ecol. Manag.* 226: 256-267.
- Condit, R., S.P. Hubbell & R.B. Foster. 1995a. Mortality rates of 205 neotropical tree and shrub species and the impact of a severe drought. *Ecol. Monogr.* 65:4 419-439.
- Condit, R., S.P. Hubbell & R.B. Foster. 1995b. Demography and harvest potential of Latin American timber species: Data from a large, permanent plot in Panama. *J. Trop. For. Sci.* 74: 599-622.
- Del Valle, J.I. 1979. Curva preliminar del cativo (*Prioria copaifera*) en un bosque virgen empleando el método de los tiempos de paso. *Rev. Fac. Nal. Agr.* 32: 19-26.
- Del Valle, J.I. 1986. La ecuación de crecimiento de von Bertalanfy en la determinación de la edad y el crecimiento de árboles tropicales. *Rev. Fac. Nal. Agr.* 39: 61-74.
- Fichtler, E., D.A. Clark. & M. Worbes. 2003. Age and long-term growth of trees in an Old-growth tropical rain forest, based on analyses of tree rings and ¹⁴C. *Biotropica* 35: 306-317.
- González, H., H.D. Gómez & F. Arteaga. 1991. Aspectos estructurales de un bosque de cativo en la región del bajo Atrato, Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr.* 44: 3-50.
- González, H. 1995. Análisis del crecimiento diamétrico de *Prioria copaifera* en condiciones naturales por medio de un modelo matemático determinístico. *Crónica Forestal y del Medio Ambiente* 10: 101-120.
- Giraldo, J.A & J.I del Valle. 2011. Estudio del Crecimiento de *Prioria copaifera* mediante técnicas dendrocronológicas. *Revista de Biología Tropical.* 59(4). En prensa.
- Grauel, W.T. 1999. Species diversity and stand dynamics of Cativo (*Prioria copaifera* Griseb.) forest in the Darien Province, Panama, p. 69-78. In C. Kleinn & M. Köhl. Long-term observation and research in forestry. Proceedings of the IUFRO S4.11 International Symposium, Turrialba, Costa Rica.
- Grauel, W.T. 2004. Ecology and management of wetland forest dominated by *Prioria copaifera* in Darien, Panama. Tesis de PhD, University of Florida, EEUU.
- Kaennel, M. & F.H. Schweingruber. 1995. Multilingual glossary of dendrochronology. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL/FNP, Paul Haupt Publisher, Berne.
- Korning, J. & H. Balslev. 1994. Growth rates and mortality patterns of tropical lowland tree species and the relation to forest structure in Amazonian Ecuador. *Journal of Tropical Ecology.* 10:151-166.
- Manokaran, N. & M.D. Swaine. 1994. Population dynamics of tree species in dipterocarp forests of Peninsular Malaysia. Forest Research Institute Malaysia, Malayan Forestry Records No 40, Kuala Lumpur, Malaysia.
- McKenzie, T.A. 1972. Observations on growth and technique for estimating annual growth in *Prioria copaifera*. *Turrialba* 22: 353-354.
- Roig, F.A. 1987. Principios y aplicaciones de la Dendrocronología. *Serie Científica* 31: 23-30.

- Schöngart, J. 2008. "Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains." *Forest Ecol. Manag.* 256: 46-58.
- Worbes, M. & W. Junk. 1989. Dating tropical trees by means of ¹⁴C from bomb test. *Ecology* 70: 503-507.
- Worbes, M. & W. Junk. 1999. How old are tropical trees? The persistence of a myth. *IAWA J.* 20: 255-260.
- Zapata, M., J.I. del Valle & S.A. Orrego. 2001. Corrección por sesgos en modelos log-normales alométricos linealizados utilizados para la estimación de la biomasa aérea. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, 18 al 20 de octubre. Valdivia, Chile.

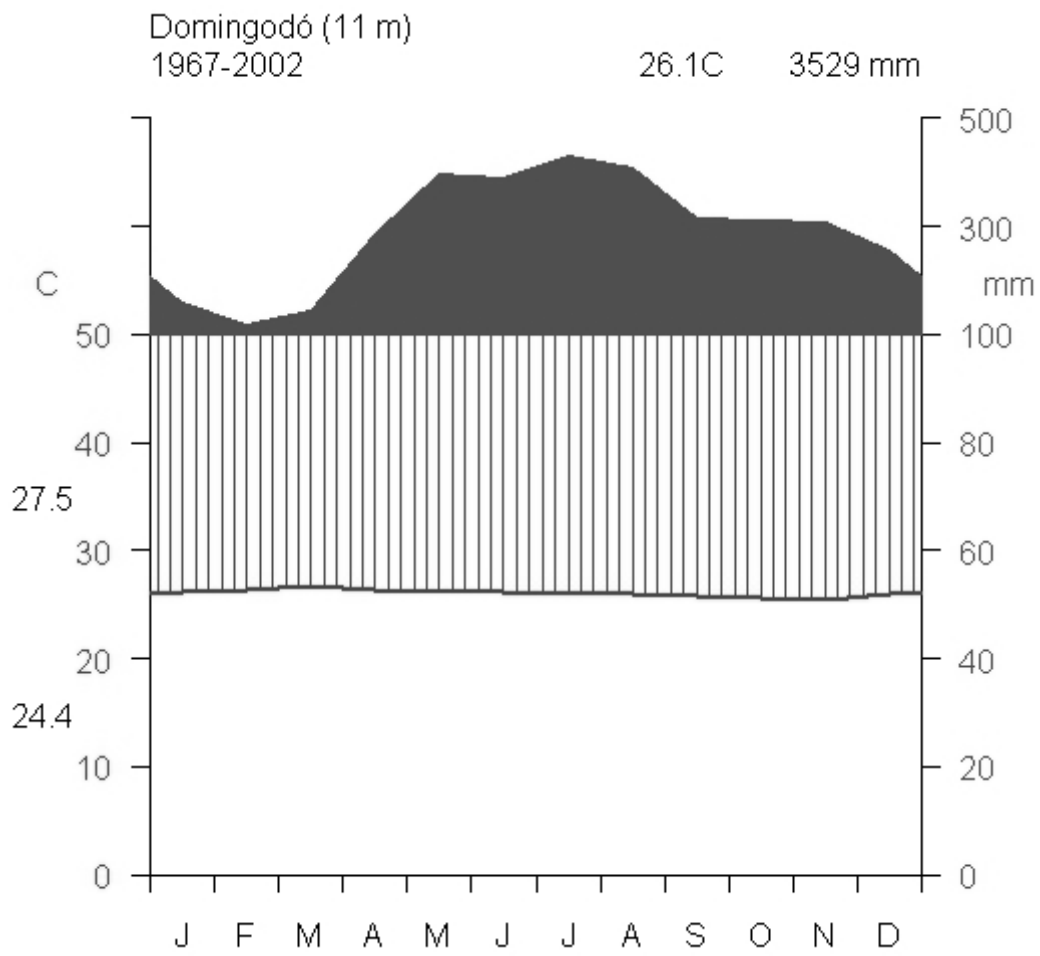


Figura 1 Climadiagrama de la estación hidroclimática cercana al área de estudio.

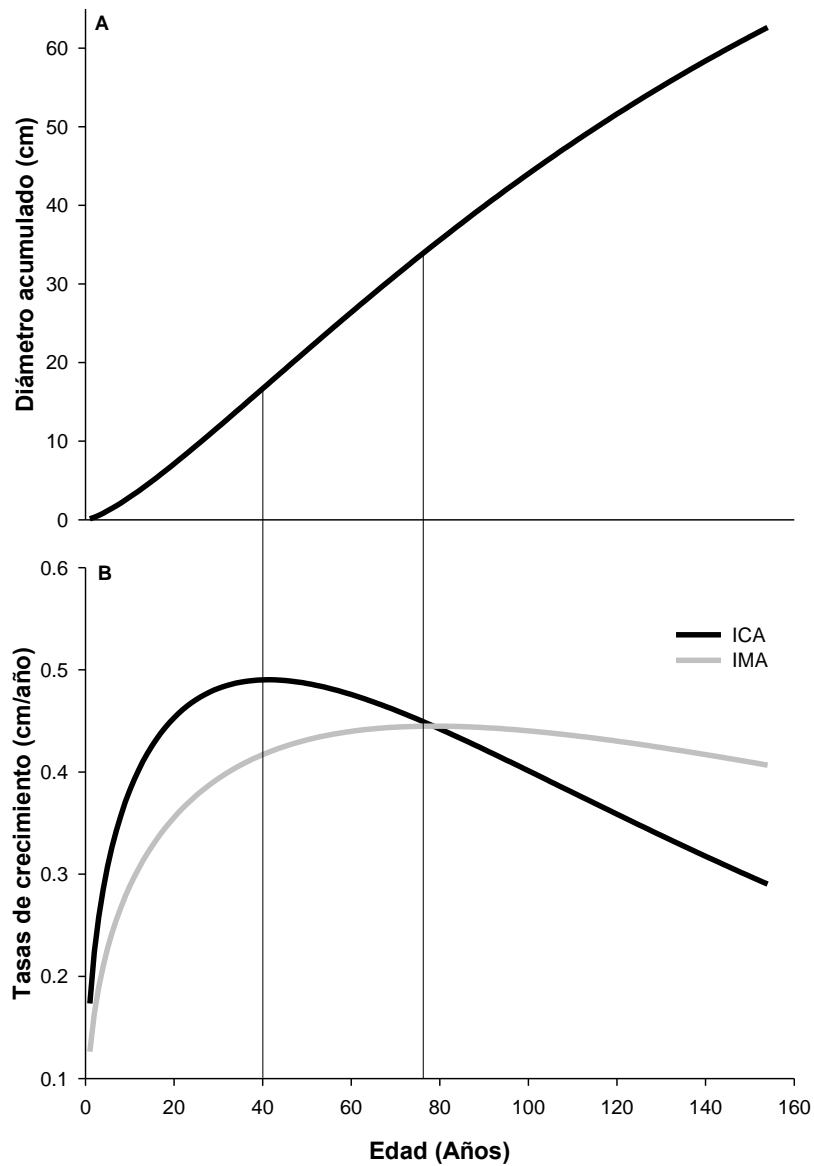


Figura 2. A) Crecimiento diamétrico modelado en función de la edad, B) Tasas incremento diamétrico derivadas del modelo crecimiento. Las líneas verticales indican los máximos valores del ICA e IMA.

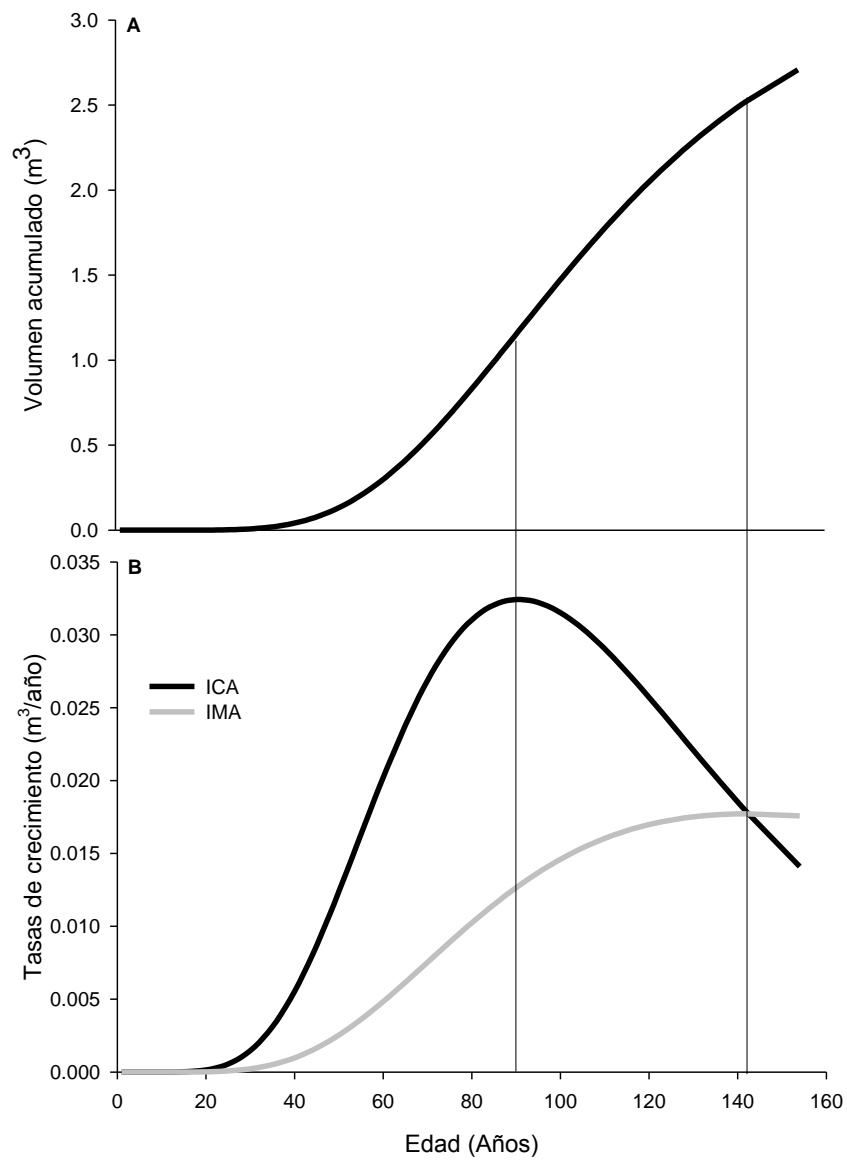


Figura 3. A) Crecimiento volumétrico en función de la edad, B) Tasas incremento volumétrico derivadas del modelo crecimiento. Las líneas verticales indican los máximos valores del ICA e IMA.