

TRABAJO CIENTÍFICO

Modelado del crecimiento de especies nativas forestales de la Selva Pedemontana de Yungas, Argentina

Growth modeling of native tree species of the Yunga Pedemontane forest, Argentina

Humano, C. A.¹

Recibido en mayo de 2018; aceptado en febrero de 2020

RESUMEN

Los planes de manejo forestal en la Selva Pedemontana de Yungas utilizan un diámetro mínimo de corta, un turno de corta y un ciclo de aprovechamiento para las especies arbóreas basados en datos estimativos obtenidos de la experiencia común, sin bases científicas, siendo la base de un sistema de manejo de tala selectivo que ha resultado inapropiado para la preservación del recurso maderable. Por ello, el objetivo de este trabajo fue definir un modelo de crecimiento, basado en variables de competencia y estructura del rodal, con el cual poder definir los turnos de corta de las especies maderables. Para ello se remidieron 8 parcelas de medición permanentes, con esos datos se obtuvo un modelo no lineal de crecimiento para las especies maderables, se definieron los parámetros estructurales que influyen en el crecimiento y se determinaron los turnos de corta. Las variables estructurales del rodal que más influyen en el crecimiento son la posición sociológica de la copa del individuo y la ocupación del rodal. Las especies que poseen los mayores incrementos diametrales son *Cedrela balansae* y *Anadenanthera colubrina* con 5,77 mm/año y 4,77 mm/año respectivamente, y en el resto de las especies maderables son menores a 3 mm/año. A partir del modelo de crecimiento se estimó que los turnos de corta de las especies maderables varían entre 30 a 135 años. El lento crecimiento de las especies maderables repercute en la lenta recuperación de la estructura forestal después de las intervenciones generando ciclos de corta mayores a 20 años.

Palabras claves: turno de corta, diámetro mínimo de corta, parámetros estructurales.

ABSTRACT

Forest management plans in the Yunga Pedemontane Forest use a minimum cutting diameter, a cutting shift and a harvesting cycle for tree species based on estimated data obtained from common experience, without scientific basis, being the basis for a selective felling management system that has proved inappropriate for preserving the timber resource. Therefore, the objective of this work was to define a growth model based on the variables of stand competence and structure out of which cutting shift of timberable species can be defined. Thus, 8 permanent measuring plots were again measured, and these data were used to obtain a nonlinear growth model for timberable species, the structural parameters influencing growth were defined and cutting shifts were determined. The most influential structural variables of stand growth are the crown sociological position of the individual and the occupation of the stand. The species with the largest diameter increments are *Cedrela balansae* and *Anadenanthera colubrina* with 5.77 mm/year and 4.77 mm/year respectively while that of the remainder timberable species is less than 3 mm/year. From the growth model designed, the cutting shifts of the timberable species was estimated as varying between 30 and 135 years. The slow growth of the timberable species impacts on the slow recovery of the forest structure after interventions by generating cutting cycles greater than 20 years.

Keywords: cutting shifts, minimum cutting diameter, structural parameters.

¹ Cátedra de Dasonomía. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Jujuy, Argentina. E-mail: cahumano@yahoo.com

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del crecimiento de los rodales forestales es básico y fundamental para la planificación del aprovechamiento y administración del recurso forestal de los bosques. En un bosque, el crecimiento está dado por la actividad de los árboles vivos, pero la sumatoria de los crecimientos individuales no refleja el crecimiento del rodal como un todo, por el hecho de que existen árboles que mueren, que son cortados y otros que ingresan en las clases diamétricas inferiores durante el período de tiempo considerado (Gauto *et al.*, 1996). Los datos de crecimientos pueden ser obtenidos de la experiencia acumulada por la observación y la práctica, por ello es indispensable la disponibilidad de modelos de crecimiento que puedan mostrar similitudes y diferencias del crecimiento entre especies y entre distintos tipos de bosques (Moscovich, 2004). Los modelos de simulación de bosques o modelos de crecimiento forestales describen el crecimiento y la dinámica del bosque, y ayudan a predecir los efectos que puede tener a largo plazo una intervención silvícola, tanto en la producción de madera como en las características futuras del propio bosque (Abellanas *et al.*, 2007). La información necesaria para la construcción de modelos de crecimiento puede provenir de sucesivas mediciones realizadas en árboles individuales marcados dentro de parcelas permanentes (Newton, 2007). El monitoreo de parcelas permanentes sobre el crecimiento y la producción de las masas forestales, resulta fundamental para la construcción de modelos de crecimiento, ya que representan la verdadera evolución de las poblaciones arbóreas estudiadas (Gadow *et al.*, 1999). Dicha información además es esencial para ser utilizada en el momento de tomar decisiones de ordenación forestal respecto a ciclos de corta, diámetros mínimos de corta y volúmenes de corta (Contreras *et al.*, 1999).

Las Selvas subtropicales de montaña del NO de Argentina constituyen unas de las áreas de mayor diversidad vegetal y animal del país, así como una de las principales fuentes de recursos madereros. La explotación forestal fue especialmente intensa en la Selva Pedemontana debido a su relieve de pendiente suave, fácil acceso, cercanía a centros urbanos, y a la creciente demanda de productos madereros (Del Castillo, 2005). En ella, la corta selectiva de individuos comerciales sin planificación fue la principal causa de la degradación de la Selva (Johns, 1992), generando una disminución de los volúmenes maderables y daños en la estructura remanente que comprometen la recuperación de la misma. Otras causas son los incendios forestales y la ganadería vacuna extensiva a monte (Minetti, 2006). La deforestación con fines agrícolas como actualmente se realiza con cultivos de soja (*Glicinimax* L. Merr.) (SAyDS, 2005), es uno de los principales agentes de pérdida de superficie boscosa. Tales condiciones afectan el valor de conservación de la Selva Pedemontana aumentando la necesidad de considerar los efectos de las variaciones de la actividad antrópica y climáticas para lograr su persistencia (Chalukian, 1991).

La legislación de las diferentes Provincias establece las normas para promover el manejo del bosque basados en los diámetros mínimos de corta (DMC). En general, el aprovechamiento del bosque se realiza respetando el DMC para cada especie, pero esta medida no se complementa con otras tendientes a asegurar la regeneración del bosque ni a regular la participación de las distintas especies en la estructura forestal (Brassiolo, 2004).

La falta total de una estrategia oficial de ordenamiento territorial para la región y de criterios de aprovechamiento sustentable de la Selva Pedemontana, están contribuyendo a la degradación y pérdida del valor productivo de estos ecosistemas. En relación con su estado de protección, la Selva Pedemontana presenta una situación actual endeble y claramente insuficiente para asegurar la persistencia de su biodiversidad, a pesar de esfuerzos recientes para revertir esta tendencia (Brown *et al.*, 2001). En términos estrictamente técnicos, las tierras destinadas a la producción forestal deben estar sujetas a un Plan General de Ordenación, de modo de lograr un suministro continuo y sustentable de madera rolliza para las empresas involucradas. Para ello se debe contar con modelos robustos que brinden simulaciones adecuadas para generar la información de base confiable para dicha planificación (Martínez Pastur *et al.*, 2002).

Por ello el objetivo de este trabajo fue definir un modelo de crecimiento que esté compuesto por variables estructurales del bosque (posición sociológica de los individuos, área basal de los individuos maderables, área basal de las especies no maderables, etc.) y con él estimar las curvas de crecimiento de las especies maderables, siendo ambas herramientas técnicas aplicables a las decisiones posibles de un manejo forestal tendiente a la sustentabilidad (Humano, 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Selva Pedemontana es el piso altitudinal más bajo de las Yungas, se encuentra entre los 400 m y 650 m s.n.m., posee el mayor interés forestal por la presencia de especies maderables como el *Cedrela balansae* C. DC. (cedro), *Myroxylon peruiferum* L. F. (quina), *Astronium urundeuva* Engl. (urundel), *Handroanthus impetiginosus* (Mart ex DC.) Mattos (lapacho rosado) (Del Castillo, 2005; Minetti, 2006). Esta Selva constituye un “relicto biogeográfico” con un papel ecológico fundamental sirviendo de refugio de aproximadamente unas 200 especies de aves (20 % de las aves argentinas) y aproximadamente 97 especies de mamíferos (27 % de los mamíferos argentinos). Es el hábitat de al menos 278 especies de plantas leñosas (árboles, arbustos y lianas). Solo de árboles encontramos 104 especies, de las cuales 40 son endémicas del sector Norte de las Yungas argentinas (provincias de Salta y Jujuy).

Ubicación de las parcelas permanentes

Se trabajó en 8 parcelas de medición permanente (PMP), que corresponden a parcelas de la Red Subtropical de Parcelas Permanentes (RedSPP) de la Fundación Proyungas (Blundo y Malizia, 2008). La ubicación de las parcelas corresponde a los departamentos de Ledesma en la provincia de Jujuy y Orán en la provincia de Salta (Figura 1), en la Selva Pedemontana de las Yungas. La localización fue definida mediante la interpretación de mapas de vegetación e imagen de satélite, además se tuvo en cuenta su accesibilidad y estado de conservación (Malizia *et al.*, 2006; Blundo y Malizia, 2008). Se encuentran distribuidas en una superficie de 1500 km², a lo largo del gradiente latitudinal entre los 22° a 28° de latitud sur y en el rango altitudinal de 400 a 800 m s. n. m., de acuerdo a la clasificación por pisos altitudinales (Brown *et al.*, 2002).

Obtención de los datos de las variables dasométricas

Los datos utilizados en este estudio fueron obtenidos de 8 parcelas de medición permanente instaladas en 2003, remedidas en 2008. Las parcelas miden 20 m x 500 m, corregidas por pendiente para cubrir una (1) hectárea (Condit, 1998). Cada parcela está subdividida en 25 subparcelas de 20 m x 20 m, localizadas en 25 cuadrantes numerados de 1 a 25 en dirección Norte (Gentry, 1995).

En cada parcela se identificaron todos los individuos con diámetro altura al pecho (DAP) iguales o mayores a 10 cm y en cada individuo se determinó: especie, DAP (medido a 1,3 m de altura por encima del suelo), altura total (distancia desde el nivel del suelo hasta el ápice del árbol), altura de fuste (distancia desde la base del tronco hasta el inicio de la copa), posición sociológica (se usó la clasificación de Dominante, Codominante, Intermedio y Oprimido de acuerdo a la posición de la copa en el canopeo y el tamaño de la misma, propuesta por Oliver y Larson (1996).

En adelante las especies maderables consideradas fueron *Anadenanthera colubrina var cebil*, *A. urundeuva*, *Calycophyllum multiflorum*, *C. balansae*, *Cordia trichotoma*, *M. peruiiferum*, *Parapiptadenia excelsa*, *Phyllostylon rhamnoides* y *H. impetiginosus*. El resto de las especies se consideraron no maderable.

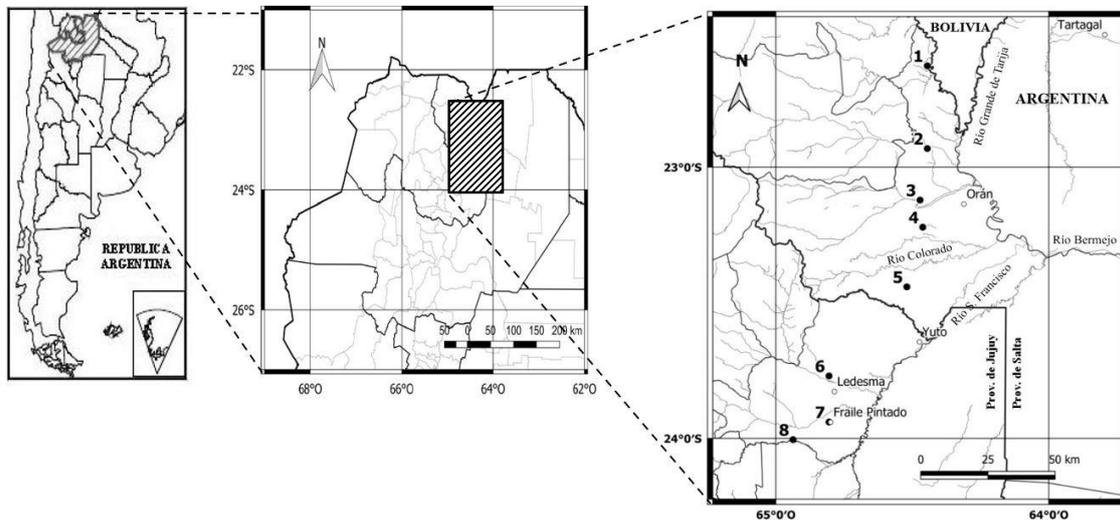


Figura 1. Ubicación de las parcelas de medición permanente en la Selva de Yungas. Parcelas de Medición permanentes: 1. Candado Chico ($22^{\circ} 37.6' - 64^{\circ} 26.7'$ -Prov. Salta), 2. Tecpetrol ($22^{\circ} 55.9' - 64^{\circ} 27.0'$ -Prov. Salta), 3. Abra Grande ($23^{\circ} 7.3' - 64^{\circ} 28.3'$ -Prov. Salta), 4. Tabacal ($23^{\circ} 13.3' - 64^{\circ} 27.7'$ -Prov. Salta), 5. Valle Morado ($23^{\circ} 26.5' - 64^{\circ} 31.2'$ -Prov. Salta), 6. San Martín ($23^{\circ} 46.2' - 64^{\circ} 48.3'$ -Prov. Jujuy), 7. Yuchán ($23^{\circ} 56.4' - 64^{\circ} 54.3'$ -Prov. Jujuy) y 8. Aibal ($24^{\circ} 0.3' - 64^{\circ} 56.2'$ -Prov. Jujuy)

Análisis de los datos

Las subparcelas en la que están divididas cada una de las parcelas fueron empleadas en los análisis estadísticos como tratamientos independientes, esta situación posee limitaciones debido a procesos de correlación espacial entre ellas, que pueden influir sobre procesos densodependientes. La estimación de la presencia de una correlación espacial, estadísticamente significativa, entre las subparcelas se llevó a cabo con el test de Mantel (Vormisto *et al.*, 2000) o con un test multivariado de Coordenadas Principales de Matrices vecinas (Silva *et al.*, 2010).

Crecimiento diamétrico de las especies

A partir de los datos de DAP obtenidos en 2003 y 2008 en las parcelas se obtuvieron los incrementos diamétricos en el período de 5 años para cada individuo medido (Araujo, 2005). Con el dato del incremento periódico dividido por la duración del periodo (5 años) se obtuvo el incremento medio anual del periodo en diámetro de cada individuo. Luego se agrupó a los individuos por especie, maderables o no maderables, clase diamétrica y posición sociológica. Cada grupo de individuos con sus respectivos incrementos anuales fueron promediados obteniendo el incremento medio anual del periodo para cada especie, valor comercial, clase y posición. Con estos datos se realizó un análisis de normalidad (Test Shapiro Willks). Posteriormente se evaluó con un análisis de la varianza no paramétrico (Test de Kruskal-Wallis, $\alpha=0,05$), la existencia de diferencias en el incremento diamétrico (variable respuesta) entre las especies maderables y no maderables en función del tamaño del árbol (clase diamétrica) (tratamientos) y la incidencia lumínica (posición sociológica) (tratamientos). El análisis anterior se realizó también solamente entre las especies maderables y también considerando la tolerancia

de ellas, heliófilas (*A. colubrina* var. *cebil*, *A. urundeuva*, *C. balansae*, *P. excelsa* y *H. impetiginosus*) y umbrófilas (*C. multiflorum*, *M. peruiferum* y *P. rhamnoides*).

Se realizó test de Kruskal Wallis ($\alpha = 0,05$) entre los incrementos medios anuales de las especies de valor forestal para determinar un ranking de crecimiento (C) de las especies.

Modelado del Crecimiento diamétrico

Para evitar la alta variabilidad de los crecimientos individuales, los valores se agruparon por categoría diamétrica de 10 cm de amplitud (Weaver, 1979), para calcular el crecimiento con la siguiente fórmula:

$$IPA_i = \left[\sum_1^K \frac{D_{i,j+1} - D_{i,j}}{K} \right] / P$$

Donde:

IPA_i: Incremento medio anual del periodo por árbol en la clase *i*.

D_i: Diámetro del individuo de la clase *i* a 1,30 m.

J: Ocasión de la medición del diámetro.

P: Período de tiempo entre las mediciones

K: N° de individuos de la clase.

Con los datos de incremento diamétrico anual de las especies maderables se ajustó un modelo mediante una función no lineal (Gasparri y Goya, 2006; Wellenbeck, 2007), con el fin de predecir el incremento periódico anual (IPA) (variable respuesta) utilizando como variables predictoras la posición sociológica de los individuos (PS), el área basal (m²/ha) de los individuos (AB), el área basal (m²/ha) de las especies no maderables correspondiente a cada cuadrante (GNM) y un ranking de crecimiento de las especies maderables (C). Se empleó el modelo matemático modificado del propuesto por Cellini (2010), este modelo generado presento el comportamiento general de los datos observados, marcando una tendencia exponencial negativa. La función matemática utilizada fue:

$$IPA = a * PS^b * AB^{-c} * GNM^{d*c^e}$$

Siendo a, b, c, y d los parámetros de la función matemática, sus valores y estadísticos del modelo se presentan en tabla 5.

La posición sociológica se discrimino en 1: árboles oprimidos; 2: árboles intermedios; 3: árboles codominantes y 4: árboles dominantes. C, representa un clasificador de las especies de acuerdo a un mayor crecimiento diamétrico en relación al tiempo. De acuerdo a los datos obtenidos en el apartado "Resultados", la especie de mayor crecimiento es calificada como 8 y la de menor crecimiento le corresponde el número 1; de esta manera se creó el siguiente ranking: *C. balansae* (8), *A. colubrina* (7), *A. urundeuva* (6), *P. excelsa* (5), *M. peruviana* (4), *H. impetiginosus* (3), *C. multiflorum* (2) y *P. rhamnoides* (1).

Curva de crecimiento por especie

La metodología desarrollada para obtener las curvas de crecimiento por especie es la propuesta por Lieberman y Lieberman (1985). Con el grupo de datos de incrementos anuales se generó una matriz de transición n x 2, donde *D_{ij}* es el DAP del árbol *i* en el año *j*, *j* = 1 (2003) o 2 (2008); para cada una de las especies maderables. La matriz de transición opera sobre un árbol

que se denomina modelo, al cual se le asignan sucesivos tamaños proyectados de incrementos específicos obtenidos de los datos relevados. Cada manipulación creó una trayectoria de crecimiento del árbol modelo. De esta manera la simulación del crecimiento genera una serie de trayectorias, produciendo numerosos valores de DAP finales para cada edad o clase diamétrica (rango de 10 cm). En la simulación del tránsito por las distintas clases diamétricas, el árbol modelo emplea cantidades variables de tiempo en cada clase diamétrica fija; el procedimiento así produce numerosos valores de DAP (edad), para cada tamaño de clase diamétrica. Cuando se simularon un gran número de curvas de crecimiento (> 500), se obtuvieron estimaciones de rangos, predicción de intervalos, medias y medianas, que fielmente reflejan la variación en la tasa de crecimiento según los datos brutos. Las sentencias en el modelo son intervalos de clase diamétrica de 10 cm (coincidente con la amplitud empleada en la distribución de individuos por clases de tamaños), período de crecimiento empleado 5 años (correspondientes a la remediación) e intervalos de confianza del 2,5 % y 97,5 % ($\alpha = 0,05$).

Para la obtención de las curvas de crecimiento se empleó el programa estadístico Project R (R Development Core Team, 2007). En este ítem solo se consideraron las especies maderables ya mencionadas anteriormente. Los gráficos obtenidos de la simulación, son bidimensionales, donde en el eje de las ordenadas está el DAP y en el eje de abscisas, el tiempo expresado en años. Además, se grafican las curvas al 2,5 y 97,5 correspondiente al límite inferior y superior de un intervalo de confianza al 95 %. La graduación del eje de abscisas se realizó, en el gráfico correspondiente para cada especie, de forma que pueda hacerse una lectura correcta del tiempo que tarda cada especie en llegar al diámetro mínimo de corta, establecidos por la Resolución N° 81/2009, para la Provincia de Jujuy.

3. RESULTADOS

Crecimiento diamétrico de las especies

Las especies presentes poseen incrementos anuales (mm/año) entre 0,20 mm a 23 mm. El incremento más frecuente es entre 0,20 mm a 2,48 mm y el que menos frecuente es entre 18,44 mm a 20,72 mm (Figura 2).

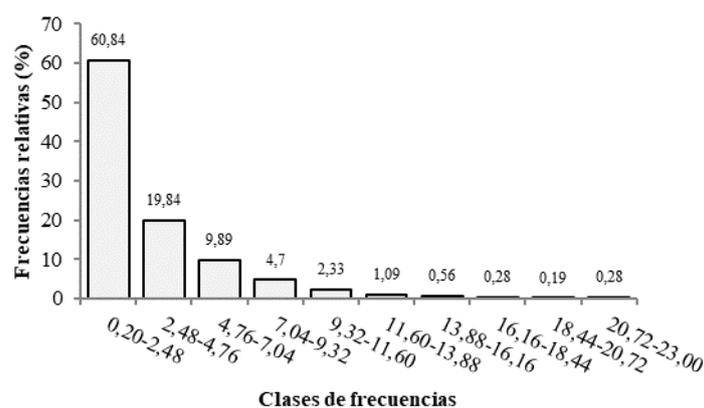


Figura 2. Distribución de frecuencias de los incrementos diamétricos anuales (mm/año) del todos los individuos (maderables y no maderables).

Dentro de una especie las tasas de crecimiento fluctúan, siendo esta variación dependiente del tamaño del individuo y de la posición sociológica que ocupan (cantidad de luz que reciben en su copa) (Tabla 1) (Tabla 2).

Si consideramos el incremento diamétrico según el tamaño de los individuos, se observa que a partir de la 2° clase diamétrica no existen diferencias entre los incrementos pero que estos son mayores que la 1° clase, la cual corresponde a los individuos de menor tamaño (Tabla 1)

Tabla 1. Incremento diamétrico medio anual del periodo (mm/año) ± la desviación estándar para las clases diamétricas establecidas.

| Clases diamétricas (cm) | N | Medias (mm) |
|--------------------------------|----------|--------------------|
| ≥10<20 | 1845 | 2,58 ± 2,31 a |
| ≥20<30 | 673 | 3,57 ± 2,93 ab |
| ≥30<40 | 334 | 3,31 ± 2,75 b |
| ≥40<50 | 190 | 2,90 ± 2,20 b |
| ≥50<60 | 95 | 3,90 ± 2,42 b |
| ≥60<70 | 38 | 3,74 ± 3,00 b |
| ≥70<80 | 22 | 4,11 ± 3,86 b |
| ≥80 | 19 | 4,08 ± 2,60 b |
| H | | 60,57 |
| P | | < 0,0001 |

Prueba no paramétrica de comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). **Medias:** valor de media aritmética ± la desviación estándar de los incrementos diamétricos (mm/año) **H:** estadístico calculado, **p:** grado de significación estadística ($p < 0,05$), letras distintas indica diferencias estadísticamente significativas.

Si se considera el incremento diamétrico según la posición sociológica de los individuos, se observa que los estratos que dominan el dosel del bosque (Dominante y Codominante) poseen mayores incrementos diamétricos que los demás estratos del sotobosque. (Tabla 2)

Tabla 2. Incremento diamétrico medio anual del periodo (mm/año) ± la desviación estándar (mm) según la posición sociológica de las especies.

| Posición sociológica | N | Medias (mm) |
|-----------------------------|----------|--------------------|
| Oprimido | 802 | 1,61 ± 2,09a |
| Intermedio | 1550 | 2,90 ± 3,13b |
| Codominante | 692 | 3,87 ± 3,53c |
| Dominante | 172 | 4,33 ± 3,91c |
| H | | 291,68 |
| P | | < 0,0001 |

Prueba no paramétrica de comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). **Medias:** valor de media aritmética ± la desviación estándar de los incrementos diamétricos (mm/año) **H:** estadístico calculado, **p:** grado de significación estadística ($p < 0,05$), letras distintas indica diferencias estadísticamente significativas.

Las especies de maderables se agruparon en tres grupos de crecimiento diamétricos. Las de crecimiento lento (CL) *C. multiflorum*, *P. rhamnoides* y *H. impetiginosus*; las de crecimiento intermedio (CI), *A. urundeuva*, *M. peruiiferum* y *P. excelsa*; y las de crecimiento más rápido (CR), *C. balansae* y *A. colubrina*. También existe un ranking de crecimiento de menor a mayor incremento *P. rhamnoides* (1), *H. impetiginosus* (2), *C. multiflorum* (3), *M. peruiiferum* (4), *P. excelsa* (5), *A. urundeuva* (6), *A. colubrina* (7) y *C. balansae* (8) (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación entre incrementos diamétricos medios anuales del periodo (mm/año) \pm la desviación estándar de las especies mayor valor forestal.

| Especie | N | Medias (mm) |
|-------------------------|----------|--------------------|
| <i>P. rhamnoides</i> | 395 | 1,23 \pm 1,3a |
| <i>H. impetiginosus</i> | 90 | 1,82 \pm 2,1ab |
| <i>C. multiflorum</i> | 198 | 1,83 \pm 1,5b |
| <i>P. excelsa</i> | 185 | 2,84 \pm 2,3c |
| <i>M. peruiferum</i> | 45 | 2,59 \pm 1,7c |
| <i>A. urundeuva</i> | 187 | 3,10 \pm 2,4c |
| <i>A. colubrina</i> | 471 | 4,77 \pm 3,4d |
| <i>C. balansae</i> | 36 | 5,77 \pm 3,7d |
| H | | 446,67 |
| p | | < 0,0001 |

Prueba no paramétrica de comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). **Medias:** valor de media aritmética \pm la desviación estándar de los incrementos diamétricos (mm/año) **H:** estadístico calculado, **p:** grado de significación estadística ($p < 0,05$), letras distintas indica diferencias estadísticamente significativas.

Se determinó que existen diferencias significativas en el incremento medio anual del periodo entre las especies heliófilas (*A. colubrina*, *A. urundeuva*, *C. balansae*, *P. excelsa* y *H. impetiginosus*) y las especies umbrófilas (*C. multiflorum*, *M. peruiferum* y *P. rhamnoides*) (GMSJ 2010) (Tabla 4).

Tabla 4. Diferencias de incremento medio anual del periodo (mm/año) \pm la desviación estándar entre las especies de valor forestal según tolerancia.

| Tolerancia | N | Medias |
|-------------------|----------|-------------------|
| Heliófilas | 933 | 3,76 \pm 3,11 a |
| Umbrófilas | 674 | 1,74 \pm 1,88 b |
| H | | 226,74 |
| p | | < 0,0001 |

Prueba no paramétrica de comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). **Medias:** valor de media aritmética \pm la desviación estándar de los incrementos diamétricos (mm/año) **H:** estadístico calculado, **p:** grado de significación estadística ($p < 0,05$), letras distintas indica diferencias estadísticamente significativas.

Modelado del Crecimiento diamétrico

Los datos de crecimiento variaron considerablemente, como se observa en los diagramas de dispersión. En estos se aplicó un análisis no lineal para tener una ecuación que ajuste aceptablemente a la dispersión de los mismos (Figura 3).

Con el objetivo de modelar el crecimiento diamétrico de las especies maderables, se ajustó un modelo de ecuación no lineal.

$$IPA = 0,111722 \cdot PS^{0,739526} \cdot AB^{-0,054870} \cdot GNM^{-0,0003} \cdot C^{4,536384}$$

Donde el incremento medio anual del periodo expresado en cm/año (IMA) es la variable dependiente y las variables independientes son la posición sociológica de los individuos (PS), el área basal correspondiente a cada individuo (AB), área basal de las especies no maderables (GNM) y un índice clasificador de las especies (C) (Tabla 5).

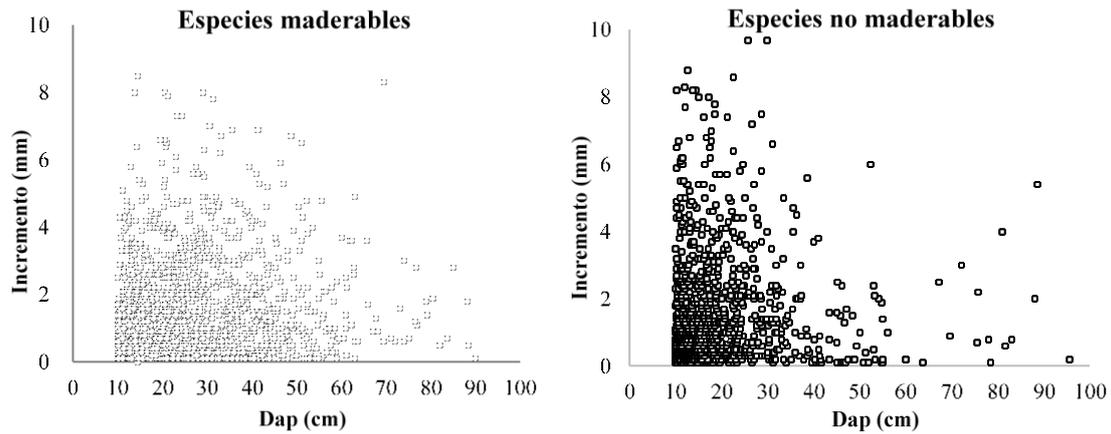


Figura 3. Diagrama de dispersión de los pares de valores (IPA, DAP) de los árboles individuales de las especies maderables y especies no maderables.

Tabla 5. Parámetros y estadísticos del modelo exponencial negativo.

| Estadístico | Estimación | Estadístico | Estimación |
|-------------|------------|----------------|------------|
| a | 0,739526 | n | 297 |
| b | -0,054870 | R ² | 41,89 % |
| c | -0,0003 | ERE | 24,54 |
| d | 4,536384 | RP | 19,43 |

Siendo a, b, c, y d: Parámetros del modelo, n: número de observaciones, ERE = error residual estandar; RP = residual promedio.

El análisis de correlación lineal (R) muestra que entre las variables que reflejan la competencia (GNM y AB) existe una menor correlación, que en el caso de PS y C las que fueron codificadas con valores ordinales; en estos casos la correlación con el IPA fue mayor. (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis de correlación entre el IPA y las variables PS, C, GNM y AB.

| Variable | R |
|----------|------|
| PS | 0,54 |
| C | 0,70 |
| GNM | 0,17 |
| AB | 0,24 |

Curva de crecimiento por especie

Las curvas de crecimiento de las 8 especies maderables se manifestaron con forma sigmoidea permitiendo observar el tiempo en lograr su diámetro mínimo de corta. (Figura 4).

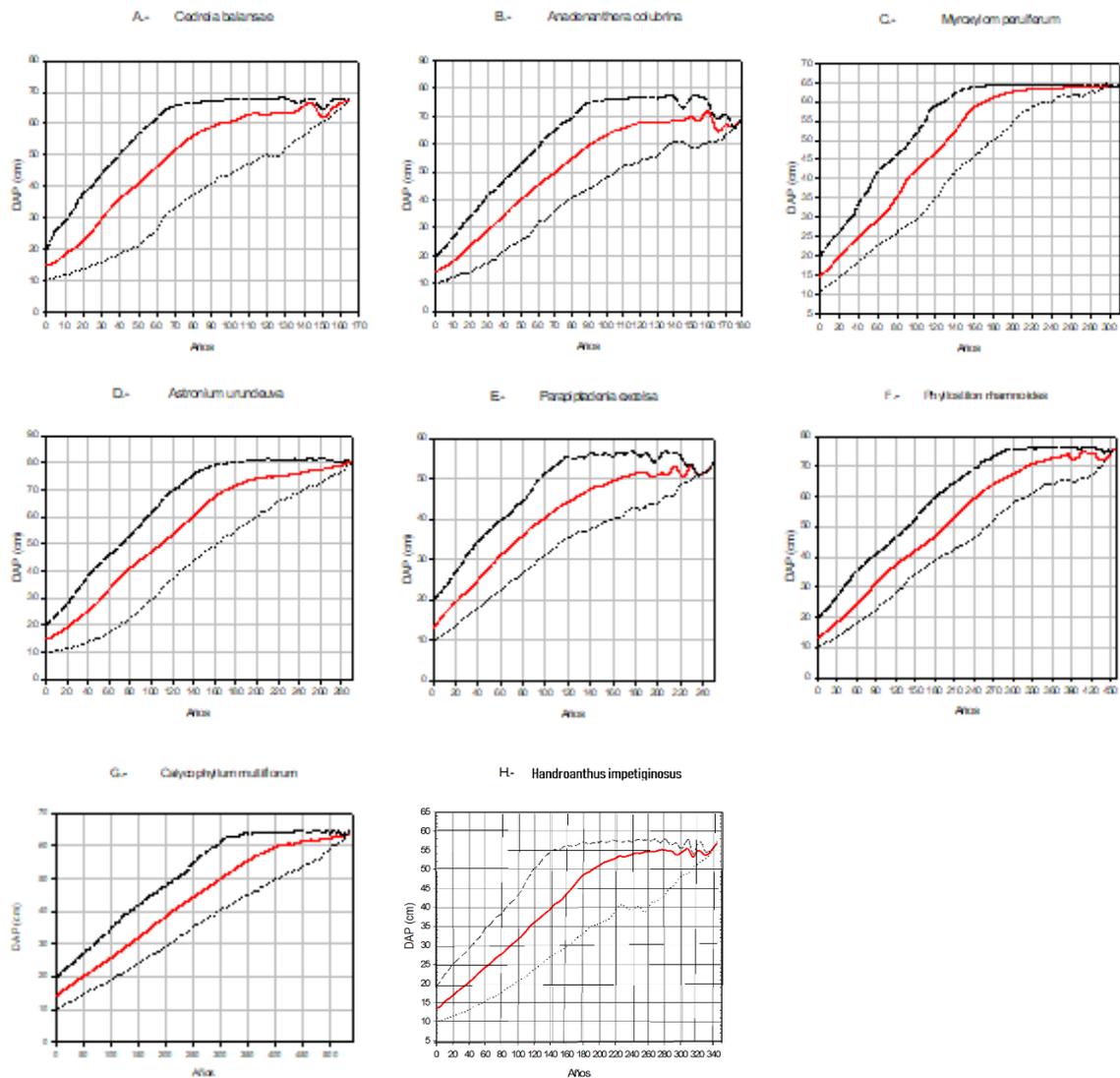


Figura 4. Curvas de crecimiento DAP (cm) vs Años; de las especies de valor forestal. A) *C. balansae*; B) *A. colubrina*; C) *M. peruiferum*; D) *A. urundeuva*; E) *P. excelsa*; F) *P. rhamnoides*; G) *C. multiflorum* y H) *H. impetiginosus*. En cada gráfico se indican el límite superior e inferior de un intervalo de confianza del 95 %.

A partir de las curvas simuladas se puede estimar el turno de corta con respecto a su diámetro mínimo de corta de las especies anteriormente mencionadas (Tabla 7).

Tabla 7. Tiempo estimado (años) en lograr el Diámetro Mínimo de Corta (DMC) de las especies maderables de la Selva Pedemontana de Yungas.

| Especie | DMC (cm) | Tiempo estimado en lograr DMC (años) | L_i (años) | L_s (años) |
|-------------------------------|----------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| <i>C. balansae</i> | 40 | 50 | 25 | 90 |
| <i>A. colubrina var cebil</i> | 30 | 35 | 15 | 55 |
| <i>P. excelsa</i> | 30 | 60 | 30 | 90 |
| <i>A. urundeuva</i> | 30 | 55 | 20 | 100 |
| <i>M. peruiferum</i> | 35 | 80 | 40 | 120 |
| <i>P. rhamnoides</i> | 30 | 85 | 40 | 130 |
| <i>C. multiflorum</i> | 30 | 135 | 60 | 200 |
| <i>H. impetiginosus</i> | 35 | 115 | 60 | 170 |

L_i : límite inferior intervalo de confianza 95 %. L_s : límite superior intervalos de confianza 95 %.

4. DISCUSIÓN

Las variables relacionadas con el tamaño (clase diamétrica) y la iluminación que recibe el individuo (Posición sociológica) son las de mayor influencia al momento de explicar el crecimiento diamétrico de los árboles (Gasparri y Goya, 2006). Los datos obtenidos demuestran que las clases diamétricas intermedias (50 cm a 70 cm de DAP) son las de mayores incrementos, y a medida que aumenta la disponibilidad de luz en la copa arbórea aumenta el incremento diamétrico correspondiente a su posición sociológica de las copas arbóreas (Tabla 2). La relación entre el tamaño del individuo y el crecimiento observado sugiere que a medida que éste aumenta de tamaño tiene mayor capacidad de captar recursos y de crecer. Esto ocurre, hasta alcanzar un determinado tamaño, en el cual la captación de recursos se vuelve cada vez más ineficiente, por lo que, la tasa de crecimiento disminuye. Esta relación es consistente con la base teórica del modelo de crecimiento biológico como por ej. el denominado Chapman y Richards (Richards, 1959), donde se puede observar que el tamaño del individuo tiene influencia en su crecimiento (Gasparri y Goya, 2006). A medida que los individuos de las clases intermedias tienen condiciones de iluminación óptimas, pueden aumentar sus incrementos anuales, teniendo mayor influencia en el crecimiento la posición de la copa que el tamaño del individuo. Una copa que domine el dosel le permitirá al individuo captar mayor cantidad de luz favoreciendo su crecimiento diamétrico (Vásquez Yanes y Orozco Segovia, 1992). En este trabajo las especies mostraron incrementos anuales que promediaron los 3 mm/año, mientras que los dominantes promediaron 4,48 mm/año. Con estos datos, de acuerdo a la clasificación de la Guía para la formulación de Planes de Manejo Forestales Sostenibles de Jujuy (GMSJ, 2010) corresponden a especies arbóreas con un crecimiento lento, menores a 5 mm/año. Los datos de incremento diamétricos anuales obtenidos son menores a los propuestos por trabajos que informan de 1 cm/año (Del Castillo, 2005; Eliano *et al.*, 2009). También son menores con respecto a datos obtenidos por análisis dendrológicos, que estiman para las especies leñosas de Jujuy, un incremento de 14,10 mm/año (Picchi *et al.*, 1994). Al compararlos con datos de otros biomas son menores con respecto a los de la Amazonía Boliviana de 3,55 mm/año (Brienen *et al.*, 2003), pero resultan mayores a los obtenidos por Araujo (2005) para las especies del Chaco Seco que es de 2 mm/año.

Al considerar las especies según su valor comercial, las especies maderables que son apreciadas por la dureza y trabajabilidad de su madera (Tortorelli, 1956), poseen mayores incrementos diamétricos, que las especies no maderables. Los mayores incrementos se registraron en los individuos de las clases diamétricas intermedias y con copas dominantes con 4,98 mm/año en las maderables y 4,13 mm/año en las no maderables, observándose que el tamaño del individuo puede influir en las tasas de crecimiento, correspondiéndoles a las clases diamétricas mayores las mayores diferencias en el crecimiento diamétrico. Se puede observar que la posición sociológica de la copa arbórea es más influyente que el tamaño en el crecimiento de las especies donde existe una marcada diferencia del crecimiento. Efectivamente se dan incrementos paulatinos del crecimiento del individuo a medida que mejora la capacidad de captar luz directa por las copas de los individuos (Tabla 2). Los datos anteriores permiten suponer que el incremento diamétrico aumentaría significativamente con medidas silvícolas que mejoren las condiciones de iluminación de los individuos de interés comercial (Gasparri y Goya, 2006). Si consideramos solamente las especies maderables, se comprueba que entre ellas existen diferencias entre los incrementos medios anuales, generándose tres grupos de especies según su crecimiento. El primero integrado por las dos especies de mayores crecimientos, *C. balansae* y *A. colubrina*, con incrementos medios anuales de 5,77 mm/año y 4,77 mm/año respectivamente, siendo ambas especies heliófilas. Un segundo grupo de crecimiento menor lo componen *A. urundeuva*, *P. excelsa*, y *M. peruiferum*, con 3,06 mm/año, 2,84 mm/año y 2,59 mm/año, respectivamente, siendo las dos primeras especies heliófilas y la tercera umbrófila; y un tercer grupo integrado por *H. impetiginosus*, *C. multiflorum*, y *P. rhamnoides*, con 1,83 mm/año, 1,82 mm/año y 1,23 mm/año respectivamente, siendo la primera una especie heliófila y las otras dos umbrófilas. En todos los grupos de especies (maderables y no maderables) el crecimiento

diamétrico es mayor en las clases diamétricas superiores y en los estratos sociales Codominante y Dominante. Si se agrupan como gremios ecológicos basados en su tolerancia (heliófilas y umbrófilas), las especies heliófilas poseen mayores incrementos diamétricos que las especies umbrófilas, notándose significativamente estas diferencias en los estratos superiores.

Son limitados los datos de incrementos diamétricos de especies nativas de las Yungas obtenidas por análisis dendrológicos o por remediación en parcelas permanentes, pero si lo hay de ensayos en plantaciones puras o mixtas de estas especies. La especie más promisoría, más ensayada y estudiada por su crecimiento y calidad de madera es *C. balansae* (Del Castillo *et al.*, 2001; Del Castillo, 2005; Pacheco y Brown, 2006; Minetti, 2006; Balducci *et al.*, 2009) encontrándose incrementos diamétricos medios anuales (IMA), en plantaciones puras, de 2,06 cm/año (Del Castillo *et al.*, 2001) y 3,2 cm/año (Balducci *et al.*, 2009). En todos los casos citados son datos mayores al obtenido en este trabajo que es de 0,58 cm/año, pero en estudios de anillos de crecimiento se obtuvo para *Cedrela sp.* un IMA de 0,46 cm/año (Wellenbeck, 2007).

Los crecimientos obtenidos y la posibilidad de aumentarlos mediante intervenciones silvícolas resultan atractivos para la disminución del turno forestal que podría lograrse al manejar intensivamente las superficies en regeneración (Martínez Pastur *et al.*, 2002). Estas intervenciones deben considerar liberar las copas y disminuir la competencia por recursos en los individuos de clases y posiciones sociales intermedias. Podría esperarse que en un rodal bajo un manejo forestal sostenido donde se consideren las clases de copa y la densidad de especies se logren aumentar las tasas de crecimiento en pos de disminuir los turnos de cortas. Por ej. los individuos de *C. balansae* al alcanzar los 30 cm a 40 cm de DAP presentan los mayores incrementos en diámetro con valores cercanos a 1 cm/año; árboles de este tamaño, cuando tienen condiciones de iluminación óptimas, pueden alcanzar hasta 2 cm/año. Esto permite prever que los turnos de corta para *C. balansae* podrían ser reducidos significativamente con medidas silvícolas que mejoren las condiciones de iluminación de los individuos de interés comercial (Gasparri y Goya, 2006)

No existen estudios fehacientes sobre el crecimiento de las especies nativas requeridas por el sector forestal local que permitan estimar los tiempos necesarios para alcanzar los DMC (Eliano *et al.*, 2009). La información generada en este trabajo conjuntamente con características ecofisiológicas de las especies y los tratamientos silviculturales adecuados servirán para la generación de un plan de manejo sustentable, lo que permitiría mejorar la actividad económica de la región y a la vez conservar la biodiversidad de estos sistemas boscosos (Badinier *et al.*, 2009). Los turnos de corta propuestos para la región son de 20 años (Del Castillo, 2005) pero de acuerdo a los datos obtenidos en el tiempo que transcurre en lograr DMC por las especies, no se considera razonable. En estudios realizados en Bolivia en biomas de características parecidas a las Yungas, con turnos de 20 años y DMC similares, se necesitan 70 años para que se recupere el volumen extraído (Brienen *et al.*, 2003). En *C. balansae*, por otra parte, el turno biológico de corta se estima en 150 años (Villalba *et al.*, 2006). De acuerdo a las simulaciones obtenidas se supone que existen tres fases de crecimiento, una fase inicial con escaso crecimiento, una fase de crecimientos crecientes con incremento diamétricos relativamente altos, y una fase de reducción del crecimiento, originada por la edad (Lamprecht, 1990).

Queda como propuesta que a partir de los datos y pautas de manejo obtenidos en este trabajo, definir un DMC y un turno de corta acorde a las características biológicas y a las tasas de crecimiento de las especies, que garantice la resiliencia del bosque y la preservación de su biodiversidad (Martínez Pastur *et al.*, 2004).

5. CONCLUSIONES

- El modelo de crecimiento obtenido servirá para predecir el tiempo en obtener los DMC y los turnos de corta de las especies maderables de la Selva Pedemontana de Yungas.
- En las especies estudiadas los mayores incrementos diamétricos medios se obtuvieron en los árboles de copa dominantes con 0,448 cm/año.
- Las especies heliófilas poseen mayores incrementos diamétricos que las especies umbrófilas (Tabla 4).
- Las variables que tienen influencia sobre el crecimiento diamétrico de las especies son el tamaño de los individuos, la posición sociológica y la densidad del rodal. Esta última expresada en cantidad de árboles por hectárea, y como los árboles dominantes son los de mayor crecimiento (Tabla 2), se espera una tendencia que, al disminuir la densidad del rodal, aumente el crecimiento de éstos.
- Las especies nativas de mayores crecimientos diamétricos son *C. balansae* (cedro Orán), *A. colubrina* (cebil colorado), *A. urundeuva* (urundel) y *M. peruiiferum* (Quina). Estas son promisorias para procesos científicos-tecnológicos de domesticación y apropiadas a aplicación de tecnología (riego presurizado y fertilización) con el objetivo de producir madera de calidad
- Los planes de manejo forestal deben incluir el manejo de la densidad del rodal para favorecer los individuos de mayor tamaño y dominantes, con lo cual se puede disminuir el tiempo en obtener el DMC.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellanas, B.; M. Abellanas y C. Vilas. 2007. *VOREST: Modelización de bosques mediante diagramas de Voronoi*, p. 198-206 en Actas de los XII Encuentros de Geometría Computacional. Universidad de Valladolid. Valladolid. España.
- Araujo, P. A. 2005. *Bases para la gestión sostenible de Bosques en Regeneración del Chaco Semiárido*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España. 218 p.
- Badinier, C.; L. R. Malizia y P. Eliano. 2009. *Definición de criterios y líneas prioritarias de acción para el manejo de las Selvas subtropicales de montaña (Yungas) del noroeste de Argentina*. p. 129-129 en Actas de las VII Jornadas Científico-técnicas, FCA, UNJu, Jujuy, Argentina.
- Balducci, E. D.; M. Arturi; J. Goya y A. Brown. 2009. *Potencial de Plantaciones Forestales en el Pedemontana de las Yungas*. Fundación ProYungas. Ediciones del Subtrópico. Argentina. 39 p.
- Blundo, C. y L. R. Malizia. 2008. Impacto del aprovechamiento forestal en la estructura y diversidad de la Selva Pedemontana, p. 387-406 en: *Ecología, historia natural y conservación de la Selva Pedemontana de las Yungas Australes*. Ediciones del Subtrópico.
- Brassiolo, M. M. 2004. *Los Bosques del Chaco Semiárido - Propuestas para la conversión de bosques degradados*. IDIA XXI 7: 23-28.
- Brienen, R.; P. Zuldema y J. Gómez. 2003. *Recuperación del Volumen de madera bajo diferentes ciclos de corta: resultados de simulaciones para seis especies maderables en el norte de Bolivia*. Programa Manejo de Bosques de la Amazonia Boliviana. Informe técnico 9. Bolivia. 23 p.
- Brown, A. D.; A. Grau; T. Lomáscolo y N. I. Gasparri. 2002. Una estrategia de conservación para las Selvas subtropicales de montaña (Yungas) de Argentina. *Ecotrópicos* 15: 147-159.

- Brown, A. D.; H. R. Grau; L. R. Malizia y A. Grau. 2001. *Los Bosques Nublados de la Argentina*. p. 623-659 en *Bosques Nublados de Latinoamérica*. Editorial INBIO. Costa Rica. 698 p.
- Cellini, J. M. 2010. *Estructura y regeneración bajo distintas propuestas de manejo de bosques de Nothofagus pumilio (Poepp. et Endl.) Krasser en Tierra del Fuego, Argentina*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 157 p.
- Chalukian, S. C. 1991. *Regeneración, Sucesión y plantas invasoras en un bosque de Yungas, Salta-Argentina*. Tesis de Magister. Universidad Nacional de Salta. Salta. Argentina. 112 p.
- Condit, R. 1998. *Field guide for tropical forest census plots: methods and results from Barro Colorado Island, Panama and a comparison with other plots*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Contreras, F.; C. Leaña; J. C. Licona; E. Dauber; L. Gunnar y N. Hager. 1999. *Guía para la Instalación y Evaluación de Parcelas Permanentes de Muestra*. Santa Cruz, Bolivia. 59 p.
- Del Castillo, E. M.; M. A. Zapater; M. N. Gil y J. Saravia Toledo. 2001. *Estudio autoecológico en especies de maderas preciosas de la Selva subtropical del noroeste argentino*. p. 25-31 en *Actas V Congreso Latinoamericano de Ecología*. Jujuy. Argentina.
- Del Castillo, EM. 2005. *Selva de Yungas del NOA (Jujuy, Salta, Tucumán). Recuperación ambiental y productiva*. 1º Ed. INTA. Jujuy, Argentina. 48 p.
- Eliano, P.; L. R. Malizia y C. Badinier. 2009. *Manejo Forestal Sustentable en Yungas. Protocolo para el desarrollo de un plan de manejo forestal e implementación en una finca piloto*. Fundación ProYungas. Ediciones del Subtrópico. Jujuy, Argentina. 65 p.
- Gasparri, N. I. y J. F. Goya. 2006. Modelos de crecimiento de *Cedrela lilloi* en el sector norte de las Yungas Argentinas. p. 105-116 en: *Ecología y producción de Cedro (género Cedrela)*. Ediciones del Subtrópico. Argentina. 224 p.
- Gadow, K. V.; A. Rojo; J. G. Álvarez González y R. Rodríguez. 1999. Ensayos de crecimiento. Parcelas permanentes, temporales y de intervalo. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 1*: 299-310.
- Gauto, A.O.; L. A. Grance; D. C. Maiocco y A. Figueiredo Filho. 1996. Crecimiento de la masa de bosque nativo en la reserva forestal Guarani (Misiones). *Yvyrareta* 7: 5-10.
- Gentry, A. H. 1995. Patrones de diversidad y composición florística en los bosques de las montañas Neotropicales. p. 85-123 en: *Bosques Nublados de Latinoamérica*. INBio. Costa Rica. 698 p.
- Guía para la formulación de Planes de Manejo Forestales Sostenible de los Bosques Nativos en la Provincia de Jujuy (GMSJ). 2010. Ministerio de Medio Ambiente. Jujuy, Argentina. 65 p.
- Humano C. A. 2013. *Modelado de la dinámica y producción forestal de la Selva Pedemontana de Yungas, Argentina*. Tesis Maestría Recursos Naturales. UBA. Argentina. 159 p.
- Johns, R. J. 1992. The influence of deforestation and selective logging operations on plant diversity in Papua New Guinea. p. 56-62 en: *Tropical deforestation and species extinction*. Chapman and Hall and the World Conservation Union. USA.
- Lamprecht, H. 1990. *Silvicultura en los Trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas*. GTZ. Alemania. 332 p.
- Lieberman, M y D. Lieberman. 1985. Simulation of Growth curve from periodic increment data. *Ecology* 66 (2): 632-635.
- Malizia, L. R.; C. Blundo y S. Pacheco. 2006. Diversidad, estructura y distribución de bosques con cedro en el noroeste de Argentina y sur de Bolivia, p. 83-103 en: *Ecología y producción de cedro (género Cedrela) en las Yungas australes*. Ediciones del Subtrópico. Argentina.
- Martínez Pastur, G.; M. V. Lencinas; J. M. Cellini; B. Diaz y P. Peri. 2002. Herramientas disponibles para la construcción de un modelo de producción para la lenga (*Nothofagus pumilio*) bajo manejo en un gradiente de calidad de sitio. *Bosque* 23(2): 69-80.

- Martínez Pastur, G.; M. V. Lencinas; R. Vukasovic P. Peri; B. Díaz y J. M. Cellini. 2004. Turno de corta y posibilidad de los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Tierra del Fuego (Argentina). *Bosque* 25 (1): 29-42.
- Minetti, J. M. 2006. Aprovechamiento forestal de cedro en las Yungas de Argentina, p. 143-154 en: *Ecología y producción de cedro (género Cedrela) en las Yungas Australes*. Ediciones del Subtrópico, Argentina.
- Moscovich, F. A. 2004. *Modelos de crecimiento y producción forestal*. Informe Técnico 55/2004. INTA (EEA- Monte Carlos). Misiones, Argentina. 42 p.
- Newton, A. C. 2007. *Forest Ecology and Conservation*. Oxford University Press. GB. 452 p.
- Oliver, C. D. y B. C. Larson. 1996. *Forest stand dynamics*. Wiley. New York. USA.
- Pacheco S. y Brown A. D. 2006. *Ecología y producción de cedro (género Cedrela) en las Yungas australes*. Fundación ProYungas. Ediciones del Subtrópico. Argentina.
- Picchi, C. G; A. N. Chocovar y M. E. Lázzaro. 1994. *Edad aproximada de las especies leñosas de Jujuy*. p. 23-25 en Actas VI Congreso Latinoamericano de Botánica. IAWA. Mar del Plata. Argentina.
- Resolución N° 081/2009. Secretaría de Gestión Ambiental. Ministerio de Producción y Medio Ambiente. Jujuy. Argentina.
- Richards, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10: 290-300.
- R Development Core Team. 2007. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS). 2005. *Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos*. Informe Regional Selva Tucumano Boliviana. Proyecto bosques nativos y áreas protegidas. Préstamo BIRF 4085-AR. Argentina.
- Silva, J.; A. Montoya; D. López y F. Hurtado. 2010. Variación florística de especies arbóreas a escala local en un bosque de tierra firme en la Amazonia Colombiana. *Acta Amazonica* 40(1): 179-188.
- Tortorelli, L. A. 1956. *Maderas y Bosques Argentinos*. Acme. Buenos Aires. Argentina. 511 p.
- Vázquez Yanes, C. y Orozco Segovia A. 1992. El Bosque Lluvioso en América Tropical: Dinámica Forestal, Reforestación, Manipulación de las Semillas y Problemas de Manejo. *Journal Tree planter's notes* 2: 119-124.
- Villalba R.; S. Delgado; M. De Membiela y D. Mendoza. 2006. Variabilidad interanual de los caracteres anatómicos en el leño de *Cedrela lilloi* en el noroeste de Argentina, p. 69-83 en: *Ecología y producción de cedro (género Cedrela) en las Yungas australes*. Ediciones del Subtrópico. Tucumán, Argentina.
- Vormisto, J; O. L. Phillips; K. Ruokolainen; H. Tuomisto y R. Vásquez. 2000. Comparison of Fine-Scale Distribution Patterns of Four Plant Groups in an Amazonian Rainforest. *Ecography* 23 (3): 349-359.
- Weaver, P. L. 1979. The growth in several tropical forest of Puerto Rico. *United States Service Research Paper SO* 152: 47-54.
- Wellenbeck, V. A. 2007. *Evaluating Site Quality in Subtropical Montane Forests in North Western Argentina*. Master thesis. an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen.

