



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

“Proyecto de Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero
Agrónomo”

Modelización del área transversal de los árboles en una plantación de pinos
en la Sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina.

Boccolini, Fernando Juan

D.N.I. 34335483

DIRECTOR: Ing. Agr. Msc. Plevich, José Omar
CO-DIRECTOR: Ing. Agr. Fiandino, Santiago

Río Cuarto – Córdoba

Abril - 2018

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
Introducción.....	6
Objetivo General.....	10
Objetivo Especifico.....	10
Materiales y métodos.....	11
El sitio bajo estudio.....	11
Método del muestreo.....	11
Determinación del incremento anual del diámetro normal.....	12
Calculo del incremento anual del área transversal.....	12
Selección de funciones de crecimiento.....	13
Resultados y Discusión.....	15
Muestreo preliminar.....	15
Incremento anual en el área transversal.....	17
Comparación del esfuerzo de muestreo.....	21
Ajuste de las funciones de crecimiento.....	24
Conclusión.....	28
Bibliografía.....	29

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1	Funciones de crecimiento utilizadas en el campo forestal.....	13
Cuadro 2	Tamaño muestral para la parametrización de las funciones de crecimiento.....	17
Cuadro 3	Número de árboles a muestrear respecto de la edad de la plantación, de acuerdo a si el cálculo se realiza a través de las proporciones acumuladas y/o del área transversal acumulada, admitiendo 5%, 10% y 20% de error respectivamente.....	22
Cuadro 4	Nivel de significación estadística en la determinación de los parámetros.....	25
Cuadro 5	Valor y significación de los parámetros para el modelo Gompertz con corrimiento....	26

ÍNDICE DE GRÁFICOS

			Página
Gráfico	1	Distribución de los diámetros a la altura del pecho de todos los árboles muestreados.	15
Gráfico	2	Distribución de clases diamétricas.....	16
Gráfico	3	Área transversal acumulada para cada uno de los años desde el momento de la implantación.....	18
Gráfico	4	Proporción del área transversal acumulada para cada año desde el momento de la implantación.....	18
Gráfico	5	Incremento corriente anual desde su implantación hasta el momento que fueron tomadas las muestras.....	19
Gráfico	6	Relación entre el crecimiento proporcional anual para cada uno de los años desde el momento de la implantación del rodal.....	20
Gráfico	7	Precipitaciones acumuladas por época del año en las últimas nueve temporadas de crecimiento.....	20
Gráfico	8	Coefficiente de variación (CV) de las mediciones de AB acumulada en términos absolutos (Área transversal) y en términos relativos (Proporciones), para cada año desde la implantación de la masa.....	21
Gráfico	9	Número de árboles a muestrear calculado a partir de las proporciones acumuladas y de área transversal acumuladas.....	23-24
Gráfico	10	Curva de ajuste del modelo Gompertz con corrimiento ajustado a partir de las proporciones acumuladas de crecimiento.....	27

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue ajustar funciones que permitan simular el crecimiento del área transversal de los árboles en un rodal de *Pinus elliottii*, determinando el incremento anual del diámetro normal y del área transversal de los individuos bajo estudio, mediante técnicas de análisis fustal. El trabajo se realizó en una de las plantaciones del establecimiento experimental “Las Guindas”, el cual se encuentra ubicado en la Sierra de Comechingones y pertenece a la Universidad Nacional de Río Cuarto. Para cumplir con los objetivos propuestos, se realizó un análisis fustal a 54 de los 249 árboles del ensayo. Se midió el diámetro a la altura del pecho de todos los árboles en la parcela para luego clasificarlos en clases diamétricas, y de esa forma seleccionar árboles representativos de cada clase. Con el uso de barreno de Pressler, se procedió a extraer dos muestras (tarugos) en cada árbol seleccionado, con el fin de medir el crecimiento en diámetro de cada año para cada uno de los árboles muestreados. A partir de estos datos se calculó el crecimiento anual en área transversal de los individuos tanto en términos absolutos como relativos (proporciones acumuladas del crecimiento). Luego, se determinó el número de árboles necesarios para poder estimar el crecimiento medio del área transversal de los individuos de la parcela utilizando: 1- el área transversal acumulada en términos absolutos; y 2- en términos de crecimiento relativo (proporciones de crecimiento). Dado que la variabilidad en las mediciones es muy superior cuando se utilizan los valores absolutos de área transversal (coeficiente de variación: 35%) respecto de si se utilizan las proporciones de crecimiento (coeficiente de variación: 4%) el esfuerzo de muestreo requerido es inferior cuando se trabaja con el crecimiento relativo. Es por ello que, a partir de las proporciones, se ajustaron 12 funciones de crecimiento. De entre ellas, la más apropiada para predecir el crecimiento de los pinos en la sierra de comechingones fue la de Gompertz con corrimiento, ya que presenta el menor *CM Error* (0.0024) y valores inferiores de *AIC* y *BIC* que el resto de los modelos.

ABSTRACT

The aim of this work was to adjust functions that allow to simulate the growth of the transversal area in a patch of land of *Pinus elliottii*, determining the analyzed individual's annual increment of the normal diameter and transversal area, through fustal analysis techniques.

The work was carried out in one of the plantations of the experimental settlement "Las Guindas", which is placed in Comechingones Hills and it belongs to Universidad Nacional de Río Cuarto.

To fulfill the proposed aims, it was made a fustal analysis out on 54 of the 249 test trees. The diameter at chest height of all trees in the parcel was measured to classify them in diametric classes, and in that way select representative trees of each class. With a Pressler bore, two samples were extracted (chunks of wood) from each selected tree, in order to measure the growth in diameter of each year for each sampling trees.

Based on these data it was calculated the individual's annual growth as much in absolute terms as relative terms (accumulated growth proportions). After that, it was determined the number of necessary trees to estimate the mean growth of the individual's transversal area of the parcel using: 1- the cumulative transversal area in absolute terms and 2- in relative growth terms (growth proportions).

Due to the variability in the measurements is much higher when the absolute values of the transversal area are used (coefficient of variation: 35%) in respect of the growth proportions are used (coefficient of variation 4%) the required sample effort is lower when you work with the relative growth. Because of that, from the proportions, 12 growth functions were adjusted. Among those, the most appropriate to predict the growth of the pines in Comechingones Hills was the Gompertz with blight, because it presents the lowest CM Error (0.0024) and lower values of AIC and BIC than the rest of the models.

INTRODUCCION

Los recursos forestales han desempeñado un papel preponderante en el desarrollo de la civilización, en muchas de las naciones, la contribución de la industria forestal y la de los productos forestales al Producto Interno Bruto es significativa (SAGPyA, 2003). La demanda de los productos forestales deriva principalmente de la necesidad de combustible para la calefacción y la cocción de alimentos, papel para impresión, cartón para empaque y material de construcción. El consumo anual promedio mundial per cápita se ha calculado entre 0,6 y 0,7 m³ (FAO, 2010).

La República Argentina cuenta actualmente con aproximadamente 1.200.000 hectáreas de Bosques Cultivados. Estos bosques están conformados casi exclusivamente por especies exóticas de rápido crecimiento, donde predominan las Coníferas, seguidas por los Eucaliptos y las Salicáceas. Prácticamente el 60 % de las forestaciones del país corresponde a especies de coníferas, fundamentalmente *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* y en menor medida otras especies como *Araucaria angustifolia*, *Pinus ponderosa* y *Pseudotsuga menziesii* (Beale y Clodoveo Ortiz, 2013).

La sierra Comechingones es una región del centro de Argentina que ocupa aproximadamente 300.000 has con más del 80 % de sus paisajes dominados por ecosistemas herbáceos denominados pastizales, que constituyen el recurso natural básico para la productividad bovina y caprina. Sobre estos pastizales actualmente se encuentran implantadas alrededor de 20.000 has de pinos (*Pinus elliottii*, *Pinus taeda* y *Pinus insignis*) con escaso o nulo manejo silvícola (Plevich, 2002).

El hecho de que una proporción mayor al 12% de la superficie de este ambiente esté ocupada por plantaciones de pinos, genera la necesidad de llevar adelante estudios que aporten información sobre la producción de biomasa en estos rodales. Meyer et al, (1961), expresa que cualquier planificación de la producción forestal debe involucrar la predicción del rendimiento futuro. Por este motivo, resulta necesario cuantificar cuál es la producción de madera del sitio en el tiempo; y determinar cuáles son los factores que inciden sobre la misma.

Para determinar el crecimiento y el desarrollo de los individuos de una masa forestal en los diferentes períodos de vida se considera el análisis del tronco o fuste, que consiste en la medición de cierto número de secciones transversales del mismo (Imaña y Encinas, 2008). El patrón de crecimiento de los árboles se establece normalmente a partir de la identificación y recuento de los anillos que aparecen en la madera (Gené et al., 1993).

Los anillos de crecimiento en los árboles son generados por la alternancia estacional entre condiciones favorables y desfavorables para el crecimiento. El cambium vascular responsable del crecimiento en diámetro de los árboles, alterna entre estados de mayor actividad y estados de latencia, originando diferencias estructurales en las células de la madera que definen los anillos de crecimiento (Fritts, 1976; Worbes, 1999)

Generalmente, durante el periodo de mayor actividad del cambium vascular los elementos anatómicos producidos poseen un lumen amplio y una pared celular delgada, constituyendo la madera temprana del anillo de crecimiento. Posteriormente, el cambium vascular entra en una etapa de menor actividad o latencia durante la cual produce células con paredes más gruesas y lumen reducido, constituyendo la madera tardía del anillo de crecimiento. Este cambio en la forma de las células es lo que determina que los anillos de crecimiento sean visibles (Fritts, 1976).

El estudio de los anillos de crecimiento proporciona información sobre la edad de los árboles y los factores que influyen en el crecimiento dimétrico y la calidad de la madera del bosque. El crecimiento de los árboles, está influenciado por factores internos relacionados con las características genéticas propias de cada especie, como: edad, tasa de división del cambium vascular, actividad fotosintética y liberación de fitohormonas, entre otros. Sin embargo, el crecimiento también está influenciado en gran medida por factores externos bióticos y abióticos, como: competencia e interrelación con otros organismos, ataque de patógenos, clima, condiciones geográficas, luz, nutrientes, disponibilidad de agua, entre otros (Fritts 1976; Panshin y de Zeeuw, 1980; Schweingruber, 1988 y 1996)

En áreas con clima estacional los árboles son capaces de formar un anillo de crecimiento cada año. Usualmente, presentan un mayor crecimiento al comienzo de la estación favorable, formando la madera temprana la cual es relativamente menos densa y por lo tanto más clara. Posteriormente, el árbol reduce su actividad fisiológica durante la estación menos favorable, formando la madera tardía la cual es mucho más densa y frecuentemente más oscura (Panshin y De Zeeuw, 1980; Hoadley, 1990; Schweingruber, 1996). La mayoría de los árboles de las zonas templadas presentan anillos de crecimiento fácilmente detectables. En general, muchas coníferas cumplen esta propiedad, ya que tienen anillos regulares en los que se definen claramente la madera temprana y la tardía, lo que facilita el recuento y medición de los anillos anuales (Gené *et al.*, 1993).

A partir del análisis de los anillos de crecimientos es posible obtener registros para realizar diversos estudios de ecología de bosques, autoecología de especies forestales, dinámica

sucesional, evaluación de perturbaciones antropogénicas y reconstrucción de los eventos climáticos del pasado (Fritts 1976; Schweingruber, 1996). Una evaluación continua de los anillos de crecimiento posibilita, a mediano y largo plazo la determinación del ritmo de crecimiento, la periodicidad de la actividad cambial y la influencia de los factores climáticos (Worbes 2001). Es por ello que, a través de la evaluación continua de los anillos de crecimiento, pueden establecerse modelos que permitan simular la evolución de un rodal en un sitio determinado.

Los modelos de crecimiento son una de las herramientas más útiles para los gestores forestales. Pueden utilizarse tanto para predecir producciones futuras como para explorar opciones de gestión y alternativas selvícolas (Crecente Campo, 2008). Un modelo forestal de crecimiento es una abstracción de las dinámicas de una masa forestal, y puede comprender el crecimiento, la mortalidad y otros cambios en la composición y la estructura de la masa que se expresan como una serie de ecuaciones matemáticas, los valores numéricos de dichas ecuaciones, la lógica necesaria para relacionarlas de un modo coherente y el código de programación requerido para implementar el modelo en un simulador (Crecente Campo, 2008).

Uno de los elementos más importantes en cualquier modelo de crecimiento de una masa forestal es la ecuación que estima el crecimiento en área basimétrica, que depende directamente del área transversal individual y la densidad de árboles. Esta variable está directamente relacionada con otras fundamentales como el volumen o el diámetro medio cuadrático, y es una herramienta básica para planificar las intervenciones selvícolas en las masas forestales (Gadow et al., 2001). Resulta importante mencionar que los cambios en el área basimétrica de un rodal quedan registrados, año a año, en los fustes de los árboles que lo componen. Este registro histórico de la evolución del rodal está constituido por los anillos de crecimiento de los árboles.

Según Atalaya (2000), las variaciones en anchuras sucesivas de los anillos de crecimiento (expresadas en porcentaje) se encuentran de manera idéntica en todos los troncos originados en una misma región. Esto significa que, se puede tener una representación precisa del crecimiento de la población realizando el análisis fustal de una cantidad pequeña de individuos. A partir de dicho análisis se pueden obtener las proporciones de crecimiento para cada árbol dividiendo el crecimiento acumulado durante cada año por el crecimiento acumulado total. Estas proporciones pueden ser utilizadas luego para obtener la dinámica de crecimiento de los árboles que fueran necesarios con sólo contar con el crecimiento acumulado total de los mismos.

La progresión relativa existente entre la suma de las superficies de las secciones normales de los árboles de una masa forestal, ubicada en un mismo sitio, es muy semejante; por

lo que se puede modelizar dicha progresión mediante funciones de crecimiento normalmente utilizadas en el campo forestal.

OBJETIVOS GENERALES

- Ajustar funciones que permitan simular el crecimiento del área transversal de los árboles en un rodal de *Pinus elliottii*, implantado en las Sierras de Comechingones del centro de la Argentina.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el incremento anual del diámetro normal y del área transversal de los individuos bajo estudio, mediante técnicas de análisis fustal.
- Determinar qué proporción del área transversal total es acumulada en cada año desde la implantación de la masa.
- Calcular el número de muestras necesarias para representar el crecimiento del área transversal media de los individuos bajo estudio, utilizando tanto los valores absolutos de área acumulada, como los valores expresados en términos de proporciones del crecimiento.
- Ajustar funciones que permitan simular el incremento del área transversal y seleccionar aquellas de mejor ajuste.

MATERIALES Y METODOS

El sitio bajo estudio.

El establecimiento experimental Las Guindas, perteneciente a la Universidad Nacional de Río Cuarto, presenta una gran diversidad de actividades entre las que se destaca la producción forestal. Está ubicado a 90 kilómetros al noroeste de la ciudad de Río Cuarto, en la zona serrana conocida como Sierra de los Comechingones. Tiene una superficie de 1.225 hectáreas y está ubicado a una altura sobre el nivel del mar que va desde los 950 metros al Este, hasta los 1600 en el extremo Oeste.

La temperatura media anual oscila entre los 15 y 18° C, con una máxima media de 29° C, y una mínima media de 3° C; con un período libre de heladas de aproximadamente 285 días. La precipitación media anual, según las observaciones realizadas durante dieciséis años en la estación meteorológica de Alpa Corral, es de 901 mm (Vázquez et al., 1979). La distribución de las precipitaciones se corresponde con el régimen monzónico, en el cual se concentran las mismas durante la estación cálida y se presenta la ocurrencia de déficit hídrico en el invierno.

El suelo del sitio fue clasificado como Hapludol lítico, el cual se corresponde con las posiciones de ladera que presentan pendientes mayores al 10 %. Se trata de un suelo algo excesivamente drenado, franco, con provisión materia orgánica moderada, con capacidad de intercambio catiónico intermedia, muy pedregoso y con alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

Método de muestreo.

Para cumplir con los objetivos propuestos en el presente proyecto se realizó un análisis fustal a un cierto número de árboles pertenecientes a un rodal experimental de 1 hectárea. En el mismo, se midió el diámetro normal (DAP) de todos los árboles contenidos con cinta dendrométrica. Luego, se clasificaron los árboles en 4 clases diamétricas: suprimidos, intermedios, codominantes y dominantes (Vita Alonso, 1978) y se seleccionó la misma cantidad de individuos de cada clase para el análisis fustal.

Con la información obtenida a partir del inventario se determinó la cantidad mínima de árboles (un árbol corresponde a una unidad de muestreo) que deberían ser medidos para tener una estimación del diámetro medio, con un error máximo admisible del 5% de la media y una confianza del 95% (Freese, 1967). Ese número de árboles se utilizó como referencia a la hora de definir la cantidad de árboles a los que se les extraerían muestras del leño para realizar el conteo

y medición de los anillos de crecimiento, dado que este tipo de mediciones insumen una cantidad considerable de tiempo y realizarlas a todos los árboles del ensayo resulta muy laborioso.

La fórmula propuesta por Freese (1967) para el cálculo del tamaño muestral es:

$$n = \frac{t^2 \times s^2}{E^2}$$

dónde:

- n: tamaño muestral (número de árboles)
- t: valor t de la tabla de Student
- E: valor de confianza
- s: error estándar

Determinación del incremento anual del diámetro normal.

Con el uso de barreno de Pressler, se procedió a extraer dos muestras (tarugos) por árbol seleccionado (54 en total), una a la altura del tocón (DAT) y la otra a la altura del pecho (DAP). Estas muestras se analizaron en el laboratorio con el fin de obtener el crecimiento en diámetro de cada año para cada uno de los árboles muestreados.

La lectura de los anillos se realizó de la siguiente forma:

1) Se fijaron los tarugos a tablillas ranuradas, se lijaron varias veces la superficie utilizando diferentes tipos de lijas, desde aquellas de grano grueso, al principio, hasta culminar con lijas de grano fino.

2) Se humedecieron los tarugos con agua para mejorar la identificación de los anillos (Gamundi, 1998).

3) Se midió los anillos con calibre y lupa.

Cálculo del incremento anual del área transversal.

Los diámetros a la altura del pecho (1,30 m) obtenidos a partir del análisis fustal, se utilizaron para calcular el valor de área transversal normal de cada árbol para cada año desde la implantación del monte ($AT = \frac{\pi DAP^2}{4}$).

A partir de los valores de área transversal anual aparente se calculó las proporciones acumuladas mediante la siguiente fórmula:

$$Pa = AT_i \div AT_t$$

dónde:

Pa: proporciones acumuladas

AT_i: área transversal normal acumulada al año i

AT_t: área transversal normal

Selección de funciones de crecimiento.

Con los valores de proporciones acumuladas del crecimiento para cada año de vida de los árboles se ajustaron 12 funciones de crecimiento utilizadas en el campo forestal (Cuadro 1). Se utilizó el módulo de regresiones no lineales del software estadístico Infostat (Di Rienzo, 2013). (Cuadro 1).

Cuadro 1 - Funciones de crecimiento utilizadas en el campo forestal (Kiviste et al., 2002).

Función	Expresión
Logística	$Vol*ha^{-1} = a/(1+b*exp(-g*año))$
Logística con corrimiento	$Vol*ha^{-1} = a/(1+b*exp(-g*año))+d$
Logística derivada	$Vol*ha^{-1} = a*b*g*exp(-g*año)/sqr(1+b*exp(-g*año))$
Gompertz	$Vol*ha^{-1} = a*exp(-b*exp(-g*año))$
Gompertz con corrimiento	$Vol*ha^{-1} = a*exp(-b*exp(-g*año)) + d$
Verhulst – Logística	$Vol*ha^{-1} = a/1+exp(b-c*año)$
Moiseev III	$Vol*ha^{-1} = exp(a+b*año+c*año^2+d*año^3)$
Hossfeld I	$Vol*ha^{-1} = año^2/(a+b*año+c*año^2)$
Smalian	$Vol*ha^{-1} = año/(a+b*año+c*año^2)$
Strand	$Vol*ha^{-1} = (año/a+b*año)^3$
Terazaki	$Vol*ha^{-1} = año/(a+b*año+c*año^2)$
Gemasi	$Vol*ha^{-1} = exp(año/(a+b*año))-1$

Las estimaciones de los parámetros del modelo de volumen forestal se realizaron por el método de mínimos cuadrados ordinarios, empleando el procedimiento interactivo de Gauss–Newton. La comparación de las estimaciones de los modelos basó en el estudio de cuatro estadísticos: el error cuadrático medio (CMError), que analiza la precisión de las estimaciones (Kiviste et al., 2002), el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Muestreo preliminar

A partir del análisis de los datos de distribución del DAP de los 249 árboles de la parcela (Gráfico 1) se pudo establecer que el rango de variabilidad está determinado por el valor mínimo de DAP que corresponde a 12,26 cm y el valor máximo de 35,33 cm. Se calcularon la media y la mediana muestral, obteniendo como resultado 23,25 y 23,23 cm respectivamente, lo cual indica que la distribución de la variable es simétrica.

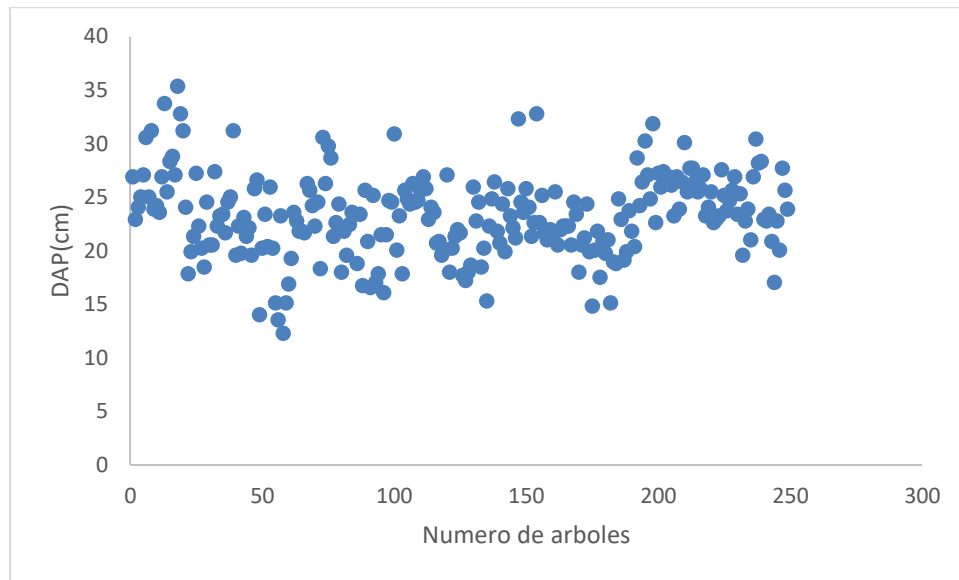


Gráfico 1 - Distribución de los diámetros a la altura del pecho de todos los árboles muestreados.

Los árboles fueron categorizados en 4 clases diamétricas a partir de sus valores de DAP (Gráfico 2):

- Suprimidos (S): DAP 12.26 – 18.02 cm.
- Intermedios (I): DAP 18.02–23.78 cm.
- Codominantes (C): DAP 23.78 – 29.54 cm
- Dominantes (D): DAP 29.54 – 35.33 cm.

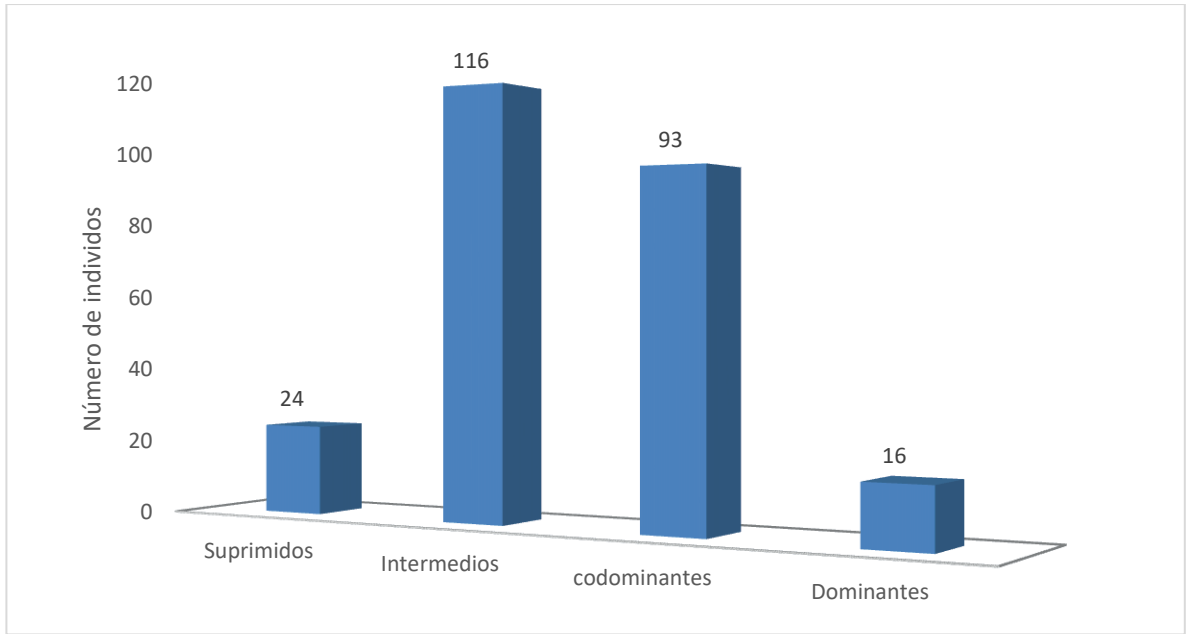


Gráfico 2 - Distribución de clases diamétricas.

El hecho de poder dividir a los árboles en clases diamétricas evidencia un crecimiento diferencial entre los mismos. La gran mayoría de los árboles se encuentran comprendidos en las clases intermedios y codominantes (209 árboles de un total de 249). En cambio, los árboles suprimidos y dominantes representan un porcentaje pequeño del total (aproximadamente el 16 %). Esta diferenciación entre individuos fue descrita por Gamundi (1998), quien interpreta que el bosque comienza a estratificarse de acuerdo a la capacidad de sobrevivencia de cada individuo, que depende de varios factores como radiación solar, agua, nutrientes, entre los más importantes. Según Vita Alonso (1978) el resultado de la competencia entre los árboles es un desarrollo desigual de las copas, produciéndose una diferenciación de ellas, en la cual los individuos más vigorosos ocupan el nivel superior y los más débiles son ahogados gradualmente hasta su muerte. Resulta interesante destacar que incluso aquellos árboles que se presentan como dominantes sufren reducción en su crecimiento a causa de la competencia. El proceso de diferenciación en clases de copa es muy dinámico y ocurre a través de la vida de un rodal si los árboles están en competencia unos con otros. El número de individuos distribuidos en cada clase de copa cambia con la edad. A mayor edad, árboles dominantes y codominantes requieren más espacio, por lo que su número tiende a disminuir (Espinosa Bancalari y Muñoz Saez, 2000). Sin

embargo, si el proceso de diferenciación que disipa la tensión competitiva no ocurre, se produce el fenómeno de Estagnación (más probable en sitios pobres y en rodales de alta densidad).

Los estadísticos utilizados en el cálculo del tamaño muestral se presentan en el cuadro 2. Se obtuvo como resultado que el número de individuos mínimo necesario para representar a la población bajo estudio es de 43 árboles.

Cuadro 2– Tamaño muestral para la parametrización de las funciones de crecimiento.

Medida	Valor
Media (cm)	23.25
Desvío estándar (cm)	3.84
Error estándar	0.24
Valor t (Student)	1,97
E (valor de confianza)	1.16
Tamaño de la muestra	42.76

Incremento anual en el área transversal

El Pino, al igual que otras especies de ciclos biológicos largos, presenta un crecimiento en forma de curva sigmoidea (Carpi, 2012), lo cual se evidencia al analizar la dinámica del área transversal (AT) acumulada por individuo en la plantación bajo estudio. En los gráficos 3 y 4, se puede observar el AT acumulada expresada tanto en términos absolutos como en términos de proporción del crecimiento, para cada uno de los años desde el momento de la implantación. La acumulación de AT sigue una tendencia exponencial hasta el octavo año de crecimiento, a partir de donde el AT presenta un crecimiento con tendencia lineal.

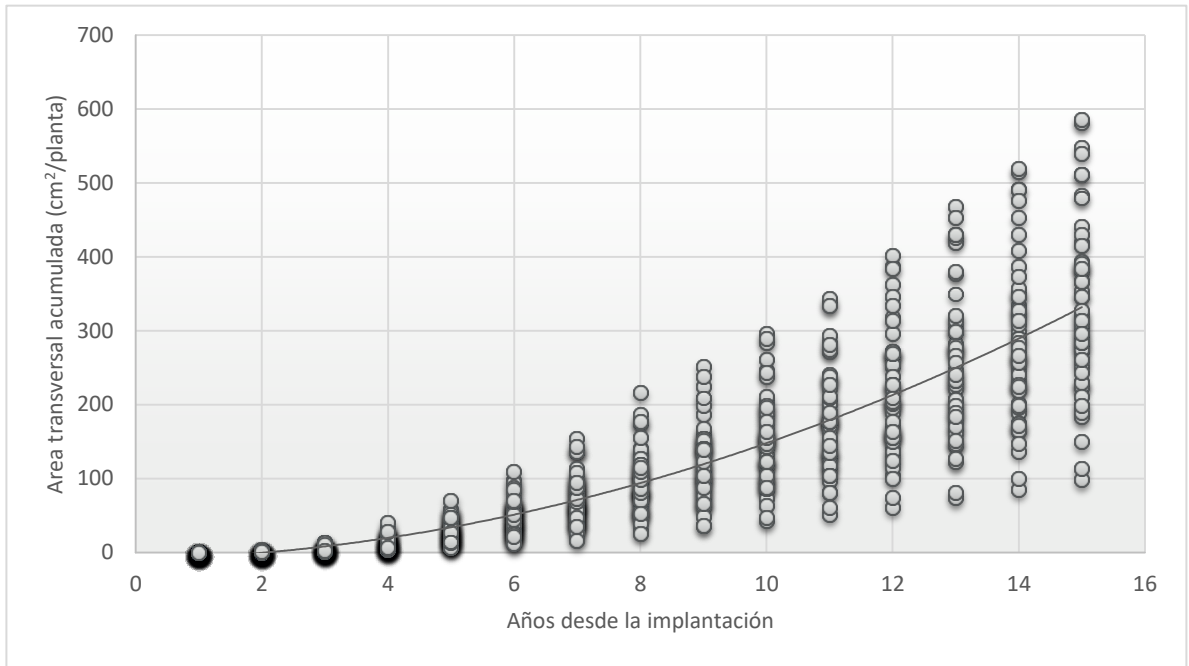


Gráfico 3–Área transversal acumulada para cada uno de los años desde el momento de la implantación.

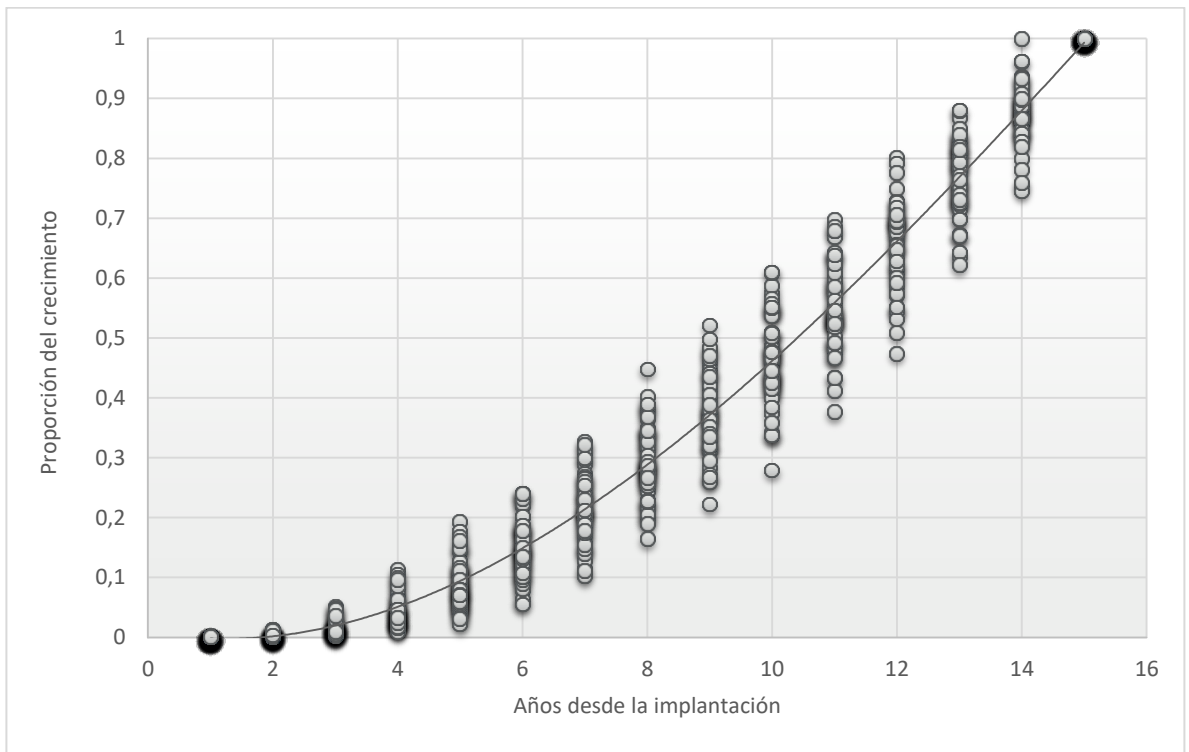


Gráfico 4– Proporción del área transversal acumulada para cada año desde el momento de la implantación.

Lo antedicho se evidencia claramente al analizar la dinámica del incremento corriente (ICA) del AT (Gráficos 5 y 6), donde hasta el octavo año la velocidad con la que se incrementa el ICA es significativamente mayor a aquella de los años posteriores, donde el ICA tiende a estabilizarse y alcanzar un valor máximo (meseta). Esto último se observa claramente al comparar el ICA medio de los últimos tres años de crecimiento.

Lo encontrado coincide con lo descrito por Imaña y Encinas (2008) quienes señalan que la primera fase de la curva corresponde a la edad juvenil y la segunda a la edad madura o rectilínea. Sin embargo, dada la edad de la plantación, no se observó todavía una disminución en el ICA que marque el inicio de la tercera etapa de crecimiento o edad senil. Cada una de las fases descriptas mantiene un ritmo de crecimiento característico de la vida total del árbol y juntas forman la curva de crecimiento característica de la especie.

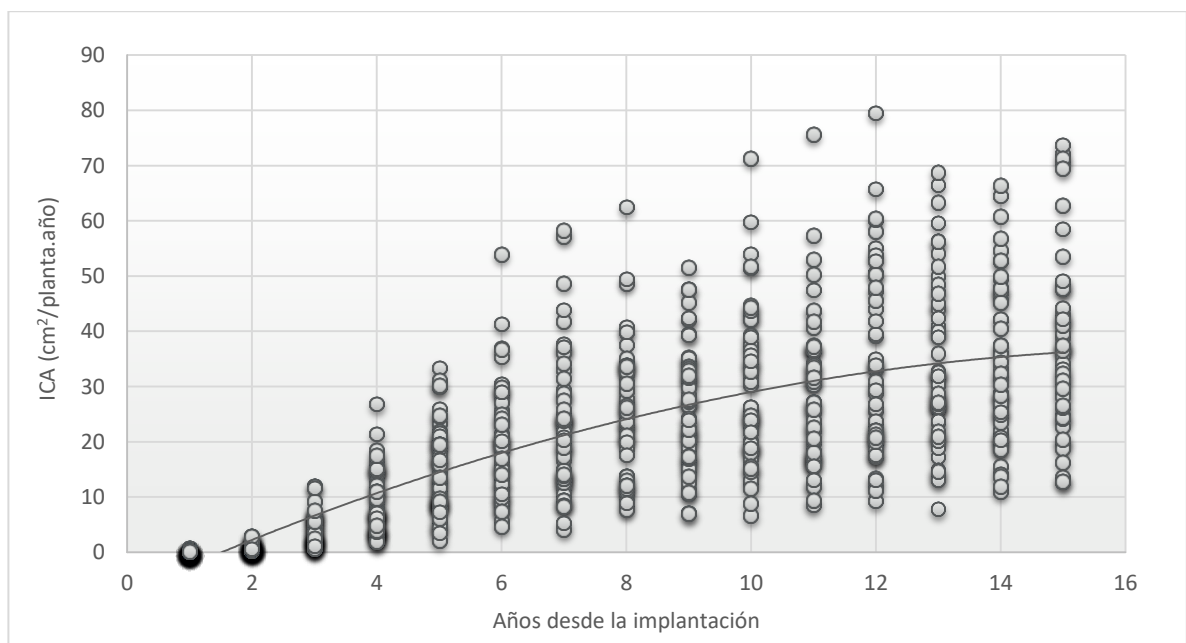


Gráfico 5– Incremento corriente anual desde su implantación hasta el momento que fueron tomadas las muestras.

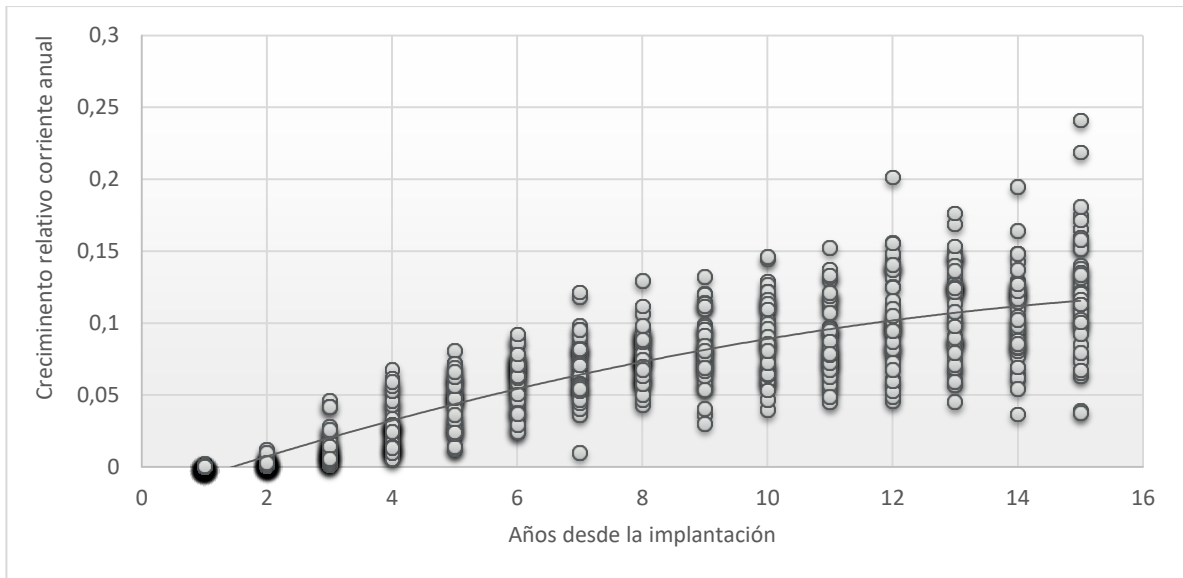


Gráfico 6– Relación entre el crecimiento proporcional anual para cada uno de los años desde el momento de implantación del rodal.

Si bien autores como Morláns, (2004) establecen estas especies van ajustando su velocidad de crecimiento de acuerdo a la resistencia que opone el ambiente, las tendencias observadas en las curvas no parecen tener relación directa las precipitaciones ocurridas durante las últimas temporadas de crecimiento (Gráfico 7), dado que no se observan incrementos o disminuciones marcadas en el ICA entre períodos con mayor y menor disponibilidad hídrica.

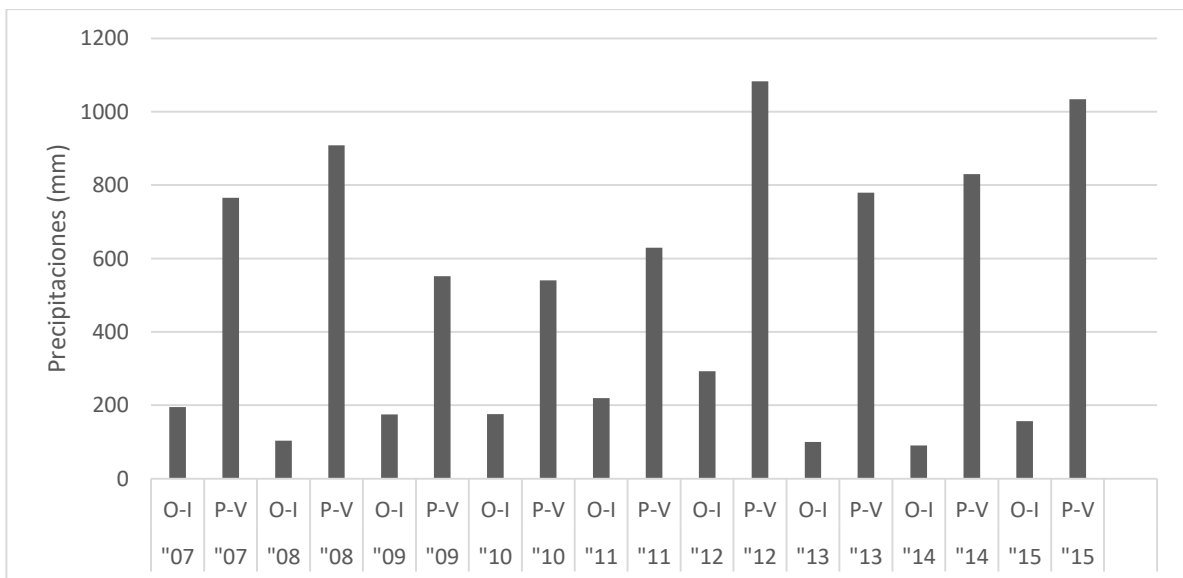


Gráfico 7: Precipitaciones acumuladas por época del año (O-I: otoño-invierno; P-V: primavera-verano) en las últimas nueve temporadas de crecimiento.

A diferencia de lo encontrado en condiciones mediterráneas semi-áridas, donde la disponibilidad de agua fue el factor que tuvo mayor impacto sobre el crecimiento radial de *P. halepensis* (Raventós et al., 2001), en la situación bajo estudio no se observó este tipo de comportamientos ni siquiera en aquellos años donde las precipitaciones fueron significativamente inferiores (2009-2011). Posiblemente ello se deba a que las precipitaciones en la época estival (momento donde el árbol crece en mayor medida) siempre fueron superiores a los 550 mm, valor cercano al mínimo de precipitación anual que necesita *P. elliotii* (600 mm) para exhibir un buen comportamiento productivo (Golfari, 1963).

Comparación del esfuerzo de muestreo

Si bien la dinámica del crecimiento sigue la misma tendencia tanto cuando se trata del AT acumulada como cuando la variable es la proporción del AT, la variabilidad en las mediciones es diferente entre las dos formas de modelar el AT (Gráfico 8).

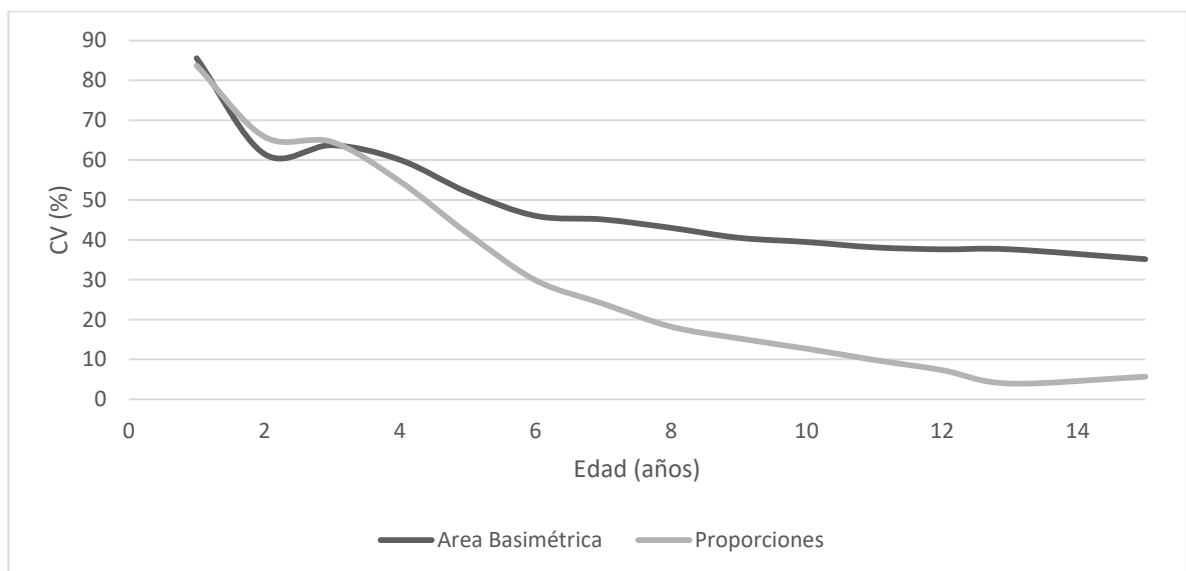


Gráfico 8: Coeficiente de variación (CV) de las mediciones de AB acumulada en términos absolutos (Área transversal) y en términos relativos (Proporciones), para cada año desde la implantación de la masa.

En los primeros años, los valores de CV son superiores a la media, y similares entre las dos variables, lo que marca la gran variabilidad que existe en términos de AT cuando la plantación es joven (Gráfico 8). Sin embargo, a medida que pasan los años, los valores de CV de las Proporciones son significativamente menores a aquellos de AT acumulada (en términos absolutos). Los valores mínimos de CV nunca bajan del 35 % para el área acumulada, mientras

que si tomamos como medida la proporción del AT acumulada los CV alcanzan valores de alrededor del 4 % en los últimos años.

Esto coincide con lo postulado por Atalaya (2000), quien expresa que las variaciones en anchuras sucesivas de los anillos de crecimiento (expresadas en porcentaje) se encuentran de manera idéntica en todos los troncos originados en una misma región. Dadas las diferencias encontradas, la cantidad de muestras necesarias para tener una representación precisa del crecimiento de la población es diferente de acuerdo a la variable utilizada.

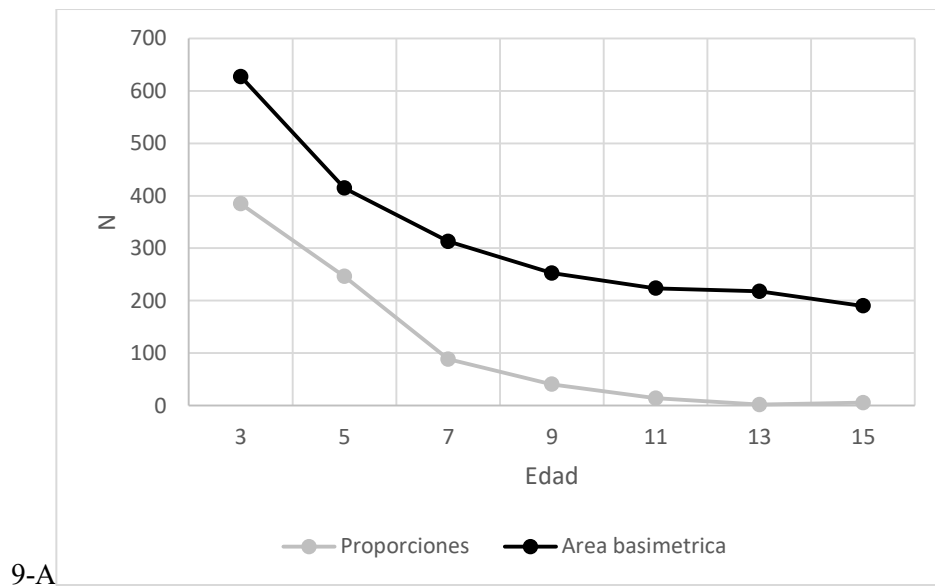
Cuadro 3: Número de árboles a muestrear respecto de la edad de la plantación, de acuerdo a si el cálculo se realiza a través de las proporciones acumuladas y/o del área transversal acumulada, admitiendo 5%, 10% y 20% de error respectivamente.

Edad	Número de árboles a muestrear					
	Proporciones			Área transversal		
	E = 5%	E = 10%	E = 20%	E = 5%	E = 10%	E = 20%
3	385	96	24	627	157	39
5	246	62	15	415	104	26
7	89	22	6	313	78	20
9	41	10	3	253	63	16
11	14	3	1	223	56	14
13	2	1	1	218	54	14
15	6	1	1	190	48	12

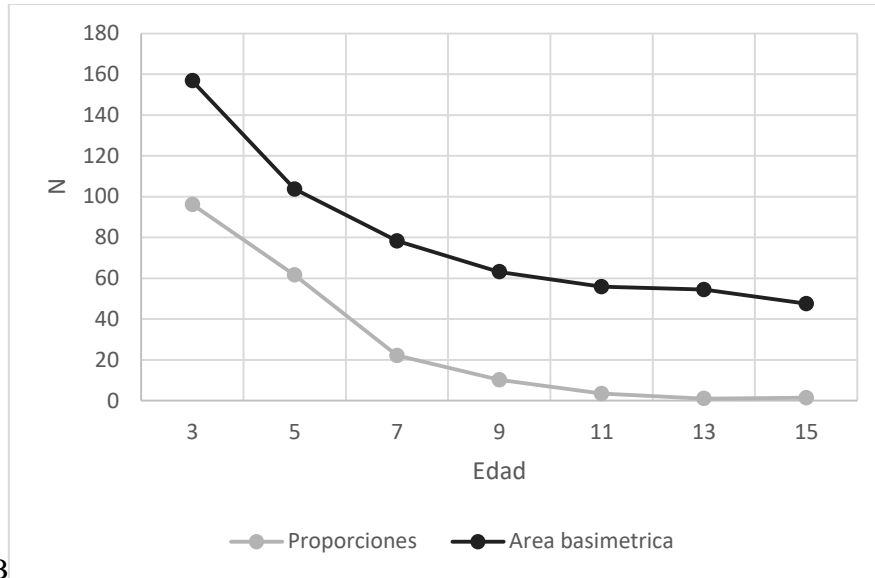
El número de árboles a muestrear es siempre menor cuando el tamaño muestral es calculado a partir de las proporciones acumuladas que a partir del área transversal acumulada (Gráfico 9 a, b y c). Para un error máximo admisible de hasta el 5 % (grafico 9.a), el número de árboles necesario para representar el área transversal media de los árboles en población al tercer año es la mitad utilizando como variable las proporciones, mientras que para el año 15 solo se necesitaría muestrear 6 árboles, 184 menos que si se utilizara como variable el AT acumulada. Asumiendo un error de 10 % (grafico 9 b), el número de árboles a muestrear sigue la misma tendencia. Tan parecida es la acumulación de biomasa en términos de proporciones entre los diferentes árboles, que para estimar el AB acumulada luego del año 11 de crecimiento, con 1 y 3 árboles a muestrear ya es suficiente. Sin embargo, si la estimación se hace a partir del AT, se necesitan entre 56 y 48 árboles para tener una buena representación del AB de la parcela. Si se permiten errores cercanos al 20%, se puede tener una estimación confiable del AB a partir del crecimiento en términos de proporciones para prácticamente cualquier año con menos de 25 árboles; y con 6 o menos árboles a partir del séptimo año de crecimiento. Como se puede apreciar, el esfuerzo de muestreo disminuye considerablemente cuando la variable utilizada es el

crecimiento relativo (proporciones). Esto tiene gran importancia dado que las muestras cuestan dinero, como así también lo hacen los errores. Por lo tanto, el objetivo en la planificación de un muestreo debe ser tomar suficientes observaciones (ni más, ni menos) para obtener la precisión deseada (Freese, 1967).

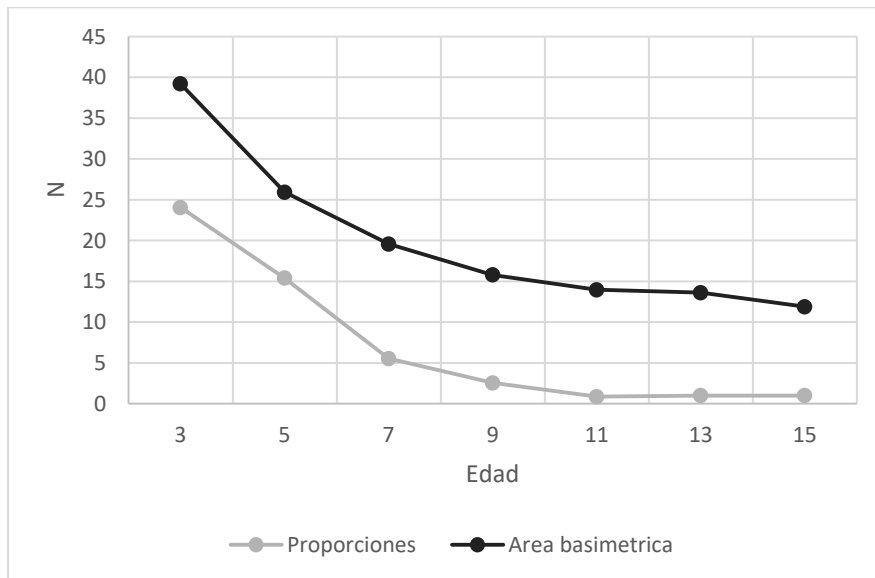
Finalmente, si se tiene en cuenta que en este estudio se midieron 54 árboles, utilizando las proporciones como variable el error de muestreo hubiese sido inferior al 20 % para estimaciones entre el año 1 y el 5, inferior al 10 % entre el 6 y el 8, e inferior al 5 % a partir del año 8. En cambio si la variable es el AT, el error hubiese sido inferior al 10% solo para las estimaciones de crecimiento posteriores al año 12, pero siempre hubiese sido mayor al 5%.



9-A



9-B



9-C

Gráficos 9 A, B y C– Número de árboles a muestrear respecto de la edad de la plantación de acuerdo a si el cálculo se realiza a través de las proporciones acumuladas y/o del área transversal acumulada, con un error máximo admisible del 5%, 10% y 20 %, para los gráficos A, B y C respectivamente.

Ajuste de las funciones de crecimiento.

Los datos de áreas fueron utilizados para parametrizar las funciones de crecimiento frecuentemente utilizadas en el campo forestal, donde el área del rodal fue la variable dependiente y la edad se usó como predictor. En el cuadro 4 se muestran los resultados

estadísticos obtenidos en el análisis de las funciones con el software estadístico Infostat (Di Rienzo, 2013).

Cuadro 4 - Nivel de significancia estadística en la determinación de los parámetros.

FUNCIÓN	P-VALOR				CM	AIC	BIC
	ALFA	BETA	GAMA	DELTA	Error		
Logística	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-----	0,0029	-7698.9	-7684.87
Logística con corrimiento	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0.0025	-7812.77	-7794.05
Logística derivada	0.9661	0.9661	<0.0001	-----	0.01	-7149.70	-7135.66
Gompertz	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-----	0.0025	-7812.67	-7798.64
Gompertz con corrimiento	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0.0003	0.0024	-7830.38	-7811.67
Verhulst - Logística	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-----	0.0027	-7735.62	-7721.59
Hosfeld I	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-----	0.0025	-7823.40	-7809.36
Smalian	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-----	0.0029	-7705.59	-7691.55
Strand	0.9995	0.9995	-----	-----	0.01	-6770.71	-6761.35
Gemesi	<0,0001	<0,0001	-----	-----	0.0042	-7393.13	-7383.77

AIC: criterio de Akaike; BIC: criterio bayesiano; CMError: error medio cuadrático.

De acuerdo a los resultados observados en el cuadro 4 las funciones más apropiadas para predecir el crecimiento en área transversal son: Gompertz con corrimiento, Hosfeld I, Logística con Corrimiento, Gompertz, Verhulst – Logística, Smalian, Logística y Gemesi. Los parámetros de estas funciones fueron estimados con un alto nivel de significación ($p < 0,05$) y el valor del *CM Error* indica que con dichos modelos se comete un error medio cercano al 5 % de la media, lo cual indica que las estimaciones son precisas. Los criterios de selección AIC y BIC, además de expresar la bondad de ajuste del modelo, penalizan aquellos con mayor número de parámetros, de acuerdo con el principio general de simplicidad científica. Se encontraron valores

muy similares para todos los modelos probados. Se optó finalmente por la función Gompertz con corrimiento, (Cuadro 4). Además de presentar el menor *CM Error* y bajos valores de *AIC* y *BIC*, es la función que mejor se ajusta al crecimiento en los primeros años del rodal.

En un estudio similar en la provincia de Lugo (España), donde se analizó la influencia que tiene la competencia sobre el crecimiento en sección de árboles de *Pinus insignis*, los modelos potencial y exponencial presentaron valores de *CM Error* de 41.3 % y 20.44 % respectivamente (Daniels *et al.* 1986). Esto indicaría que modelos que presenten la forma de una curva logística son mejores para representar el crecimiento en AB de los árboles. Además, el utilizar las proporciones como variable, permite trabajar con datos que presentan una menor variabilidad.

Cuadro 5–Valor y significancia de los parámetros para el modelo Gompertz con corrimiento.

Parámetro	Estimación	P – valor
ALFA	2.52	< 0,0001
BETA	5.37	<0,0001
GAMMA	0.12	< 0,0001
DELTA	-0,03	0.0003

El cuadro anterior presenta el resultado obtenido con el programa Infostat (Di Rienzo, 2013) tras realizar la regresión no lineal de los datos muestrales de acuerdo al modelo Gompertz con corrimiento. Los datos de relevancia para la elección del modelo fueron tomados de la salida de este software estadístico (*CMError*, estimación de los parámetros y *p*-valor) y fueron utilizados para obtener la curva de crecimiento (en términos de proporciones) para los 15 años de la especie en estudio (Gráfico 10).

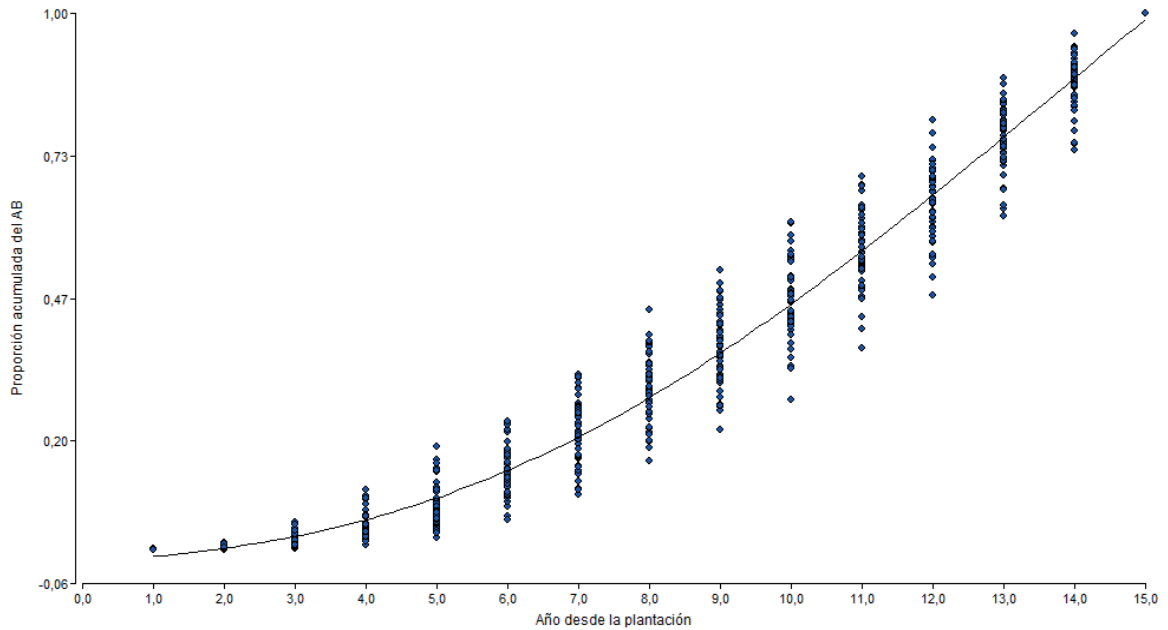


Gráfico 10– Curva de ajuste del modelo Gompertz con corrimiento ajustado a partir de las proporciones acumuladas de crecimiento.

Las predicciones matemáticas del modelo Gompertz con corrimiento describen el comportamiento biológico del pino. La curva de crecimiento de la especie comienza con una fase de crecimiento lento en los primeros años, se va acelerando hasta hacerse lineal luego del octavo año. Al ser aun una plantación joven, no se observa una desaceleración de la tasa de crecimiento, lo que seguramente se dará a una edad más avanzada de los árboles. Además de la edad, hay que considerar que los árboles en la parcela se encuentran en densidades relativamente bajas, lo que retrasa los efectos de la competencia. Resultados similares fueron obtenidos por autores como Fiandino y Plevich (2014) quienes encontraron una alta semejanza en las proporciones anuales de crecimiento entre los árboles intermedios, codominantes y dominantes en una cortina forestal del sur de Córdoba. Esto indicaría que la relación genotipo-ambiente produce un efecto similar en todos los árboles que crecen en una misma área. Finalmente, la modelización del área transversal por este método es una herramienta muy valiosa, dado que conociendo la densidad de árboles se puede obtener el área basimétrica del rodal. El área basimétrica, en conjunto con una función directriz de altura, puede ser utilizada para producir estimaciones confiables de la dinámica del crecimiento en volumen (Fiandino y Plevich, 2014).

CONCLUSIÓN

Se pudo demostrar que la relación genotipo-ambiente actúan de forma muy similar en árboles que crecen en la misma área, como se pueden ver los resultados de los análisis en los anillos de crecimiento muestran una alta semejanza en las proporciones anuales de crecimiento. Debido a ello, se pudo predecir satisfactoriamente el crecimiento de *Pinus elliottii* a partir de la función de Gompertz con corrimiento.

El esfuerzo de muestreo requerido es siempre inferior cuando el tamaño muestral es calculado a partir de las proporciones acumuladas de crecimiento (crecimiento relativo) que cuando se utilizan los valores absolutos de área transversal acumulada.

BIBLIOGRAFIA

- ✓ ATALAYA, A. 2000. Los árboles: Archivos del tiempo. Dendrocronología. En: www.infomadera.Net/uploads/articulos/archivo_2034_17591.pdf_Consultado: 8-9-2013
- ✓ ANDREU, L.; GUTIÉRREZ, E.; MACIAS, M.; RIBAS, M.; BOSCH, O.; CAMARERO, J.J.; 2007. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Glob. Change Biol.* 13(4) 804–815
- ✓ BEALE, I., AND CLODOVEO ORTIZ, E. 2013. El Sector Forestal Argentino Bosques Implantados. *Rev. Divulg. Téc. Agríc. Agroindustrial.*
- ✓ CALVILLO GARCÍA, J.C., CORNEJO OVIEDO, E.H., VALENCIA MANZO, S., AND FLORES LÓPEZ, C. 2005. Estudio epidométrico para *Pinus herrerae* Martínez en la región de CD. Hidalgo, Michoacán, México. *For. Veracruzana* 7, 5–10
- ✓ CARPI, H. (2012). Funciones de crecimiento para álamos regados con aguas residuales en Adelia María, Córdoba, Argentina. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Río Cuarto
- ✓ CRECENTE CAMPO, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad Santiago de Compostela.
- ✓ DI RIENZO, J. A.; F. CASANOVES; M. G. BALZARINI; L. GONZALEZ; M. TABLADA Y C. W. ROBLEDO. 2011. *InfoStat, versión 2011*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 333 p.
- ✓ DANIELS R.F., BURKHART H.R., CLASON T.R., 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Can. J. For. Res.* 16, 1230-1237.
- ✓ ESPINOSA BANCALARI, M. y F. MUÑOZ SAEZ. 2000. *Silvicultura Aplicada I: Apuntes de clase*. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento Silvicultura. 129 p.
- ✓ FAO. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal. Estudio FAO Montes n.º 163 Roma (disponible en <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>).
- ✓ FIANDINO S. I. y J. O. PLEVICH. “AJUSTE DE FUNCIONES DE CRECIMIENTO PARA *Pinus Elliottii* Engelm. DEL BOSQUE COMUNAL DE LA LOCALIDAD DE SAN BASILIO, CÓRDOBA, ARGENTINA”. XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. El Dorado, Misiones. Mayo 2014.

- ✓ FREESE, F. 1967. *Métodos estadísticos elementales para técnicos forestales*. 1^{ra} ed. Centro Regional de Ayuda Técnica, Agencia Para el Desarrollo Internacional, EE.UU. 105 p.
- ✓ FRITTS, H. C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic press. London, New York, San Francisco.
- ✓ FRITTS, H.C. & SWETNAM, T.W. 1989. *Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments*. Advances Ecol. Res.
- ✓ GADOWK.V., REAL P., ÁLAVAREZ GONZALEZ J.G. 2001. *Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques*. IUFRO World Series vol. 12, Vienna.
- ✓ GAMUNDI G. 1998. El raleo forestal. En: <http://www.bse.com.uy/almanaque/Almanaque%201982/pdf/0%20-%20041.pdf>. Consultado: 10/12/2012.
- ✓ GENÉ, C., J.M. ESPELTA., M. GRACIA, J. RETANA. 1993. *Identificación de los anillos anuales de crecimiento de la encina (Quercus ilex L.)*. Centre de Recerca Ecológica y Aplicacions Forestals. Universitat Autònoma de Barcelona. Revista Orsis.
- ✓ GOLFARI, L. 1963. *Exigencias climáticas de las coníferas tropicales y subtropicales. El comportamiento de algunos pinos exóticos, especialmente en América Latina*. *Unasylva (FAO)*. 17(1), 1-10.
- ✓ HENRY, M., BESNARD, A., ASANTE, W.A., ESHUN, J., ADU-BREDU, S., VALENTINI, R., BERNOUX, M. & SAINT-ANDRÉ, L. 2010. *Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest*.
- ✓ IMAÑA E., J., ENCINAS B., O. 2008. *Epidometria Forestal (Brasilia, Brasil: Brasilia. Universidad de Brasil, Departamento de Engenharia Florestal Merida: Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales.)*.
- ✓ KIVISTE, A.; J. G. ALVAREZ GONZÁLEZ; A. ROJO ALBORECA y A. D. RUIZ GONZÁLEZ. 2002. *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid. España. Vol. 4.
- ✓ MEYER, H.; A. RECKNAGEL; D. STEVENSON y R. BARTOO. 1961. *Forest Management*. Ronald Press, Nueva York. 282 p.
- ✓ OLIVAR, J.; BOGINO, S.; SPIECKER, H.; BRAVO, F.; 2012. *Climate impact on growth dynamic and intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (Pinus halepensis) trees of different crown classes*. *Dendrochronologia* 30 35-47

- ✓ PANSHIN, A. J. Y C. DE ZEEUW. 1980. Textbook of Wood Technology, 4th Edition. McGraw- Hill Book Company, New York.
- ✓ PLEVICH, J. O.; NUÑEZ C. O.; CANTERO J. J.; DEMAESTRI M. Y S. VIALE. 2002. Biomasa del pastizal bajo diferentes densidades de pino (*Pinus elliotti*). Agroforesteria en las Americas vol 9 N° 9 : 33-34.
- ✓ RAVENTÓS, J.; DE LUÍS, M.; GRAS, M.; CUFAR, K.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J.; BONET, A.; SÁNCHEZ, J.; 2001. Growth of *Pinus pinea* and *Pinus halepensis* as affected by dryness, marine spray and land use changes in a Mediterranean semiarid ecosystem. *Dendrochronologia* 19 211-220
- ✓ SCHWEINGRUBER, F. H. 1988. Tree rings. Basics and applications of dendrochronology. Reidel, Dordrecht.
- ✓ SCHWEINGRUBER, F. H. 1996. Tree rings and Environment. Paul Haupt AG Bern, Berne, Suiza.
- ✓ VÁZQUEZ, J.B., A.L. ROBLES, D. F. SOSA y M.P. SAEZ, 1979. Aguas. in: Geografía Física de la Provincia de Córdoba. Vázquez, Miatello y Roque (eds.) Boldt, Córdoba.
- ✓ VITA ALONSO, A. 1978. *Los tratamientos silviculturales*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 234 p.
- ✓ WORBES, M. 1999. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve, in Venezuela.
- ✓ WORBES, M. 2001. Forest growth in the tropics. Short Script. Freiburg, Germany.
- ✓ ZUCCHINI, HUGO. SAGPYA. 2003. Manual Básico de Referencia de Buenas Prácticas Forestales.