



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO  
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero  
Agrónomo

Modalidad: Proyecto

**Curvas de calidad de estación para la especie *Pinus elliottii* en  
la Sierra de Comechingones del sur de Córdoba.**

**Banchero, Franco**

**DNI: 37.127.666**

**Director:** Ing. Agr. MSc. Plevich, José Omar

**Co-Director:** Ing. Agr. Fiandino, Santiago Ignacio

**Río Cuarto, Córdoba**

**Julio-2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO.  
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA.**

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

**“Curvas de calidad de estación para la especie *Pinus elliottii* en  
la Sierra de Comechingones del sur de Córdoba.”**

Autor: Banchemo, Franco.  
DNI: 37.127.666

Director: Ing. Agr. MSc. Plevich, José Omar  
Co-Director: Ing. Agr. Fiandino, Santiago Ignacio

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

Prof. Plevich, José Omar \_\_\_\_\_

Prof. Fiandino, Santiago Ignacio \_\_\_\_\_

Prof. Demaestri Marcela \_\_\_\_\_

Prof. Guevara, Ernesto \_\_\_\_\_

Fecha de Presentación: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Secretario Académico

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue construir curvas de calidad de sitio para rodales de la especie *Pinus elliottii* en la Sierra de Comechingones, Córdoba. Este tipo de estudio constituye la base para el desarrollo de modelos de predicción del rendimiento forestal, los cuales son fundamentales para establecer las pautas para un correcto manejo de las plantaciones. El trabajo se realizó en el campo de experimentación y docencia “Las Guindas” de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Se definieron tres sitios en base a mapas de pendientes y observaciones a campo: Valle, Ladera baja y Ladera alta. Se realizó un muestreo al azar estratificado (en base a los sitios definidos), muestreando un total de 40 parcelas de 324 m<sup>2</sup>. En cada una de estas se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de 5 árboles dominantes. Mediante técnicas de análisis fustal se estimó el crecimiento anual en altura de 24 árboles dominantes de diferentes parcelas y estratos. A partir de estos datos, se definieron los valores de Índice de Sitio para cada estrato, y se ajustaron modelos de regresión no lineal para la construcción de las curvas de calidad. Los valores de Índice de Sitio fueron de 15, 51, 13, 68 y 11,92 para el Valle, la Ladera baja y la Ladera alta respectivamente, calculados todos a una edad de referencia de 16 años. La bondad de ajuste de los modelos fue alta, con coeficientes de determinación de 0,95, 0,93, 0,96 para Valle, Ladera baja y Ladera alta, respectivamente. Los errores medios de predicción fueron bajos, dado que representaron un 9%, 5% y 9% de la altura media para el Valle, la Ladera baja y la Ladera alta, respectivamente. Los modelos generados permiten predecir de manera satisfactoria la productividad potencial de la especie *Pinus elliottii* en los sitios característicos de la región, y seguramente sean utilizados a posteriori para el desarrollo de modelos de predicción del volumen forestal.

**Palabras clave:** *Pinus elliottii*, Sierras de Comechingones, Índice de Sitio, Análisis Fustal, Curvas de Calidad de Sitio, Planificación Forestal.

## ABSTRACT

The objective of this work was to build site quality curves for stands of the *Pinus elliottii* species in the Sierra de Comechingones, Córdoba. This type of study is the base for the development of forestry performance prediction models, which are fundamental to establish the guidelines for a correct management of the plantations. The work was carried out in the field of experimentation and teaching "Las Guindas" of the National University of Rio Cuarto. Three sites were defined based on slope maps and field observations: Valley, Low hillside and High hillside. Stratified random sampling was carried out (based on the defined sites), sampling a total of 40 plots of 324 m<sup>2</sup>. In each of these, the diameter at breast height (DBH) and the height of 5 dominant trees were measured. The annual growth in height of 24 dominant trees from different plots and strata was estimated using fusional analysis techniques. From these data, the Site Index values were defined for each stratum, and non-linear regression models were adjusted for the construction of the quality curves. The Site Index values were 15.51, 13.68 and 11.92 for the Valley, the Low hillside and the High hillside, respectively, all calculated at a reference age of 16 years. The goodness of fit of the models was high, with coefficients of determination of 0.95, 0.93, 0.96 for Valley, Low hillside and High hillside respectively. The average prediction errors were low, given that they represented 9%, 5% and 9% of the average height for the Valley, the Low hillside and the High hillside respectively. The generated models allow a satisfactory prediction of the potential productivity of the *Pinus elliottii* species in the characteristic sites of the region, and surely, they will be used for the development of forestry volume prediction models.

**Key words:** *Pinus elliottii*, Sierras Comechingones, Site Index, Fustal Analysis, Site Quality Curves, Forest Planning.

## INDICE GENERAL

### Contenido

INTRODUCCION .....	1
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos .....	5
MATERIALES Y MÉTODOS .....	6
El área de estudio.....	6
Inventarios y tamaños muestrales .....	7
Incremento anual en altura.....	11
Construcción de las curvas de índice de sitio .....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
Inventarios y tamaños muestrales .....	17
Incremento anual en altura.....	19
Construcción de las curvas de índice de sitio .....	21
CONCLUSIONES .....	25
BIBLIOGRAFIA .....	26

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Rangos de DAP por clase diamétrica y por posición topográfica.....	17
<b>Cuadro 2.</b> Mortalidad por edad y por sitio.....	18
<b>Cuadro 3.</b> Árboles seleccionados para el apeo por rodal y por sitio.....	19
<b>Cuadro 4.</b> Altura a la que se extrajeron las rodelas en cada árbol. ....	20
<b>Cuadro 5.</b> Rango de edades al DAP I halladas en el fechado de las rodelas. ....	21
<b>Cuadro 6.</b> Índices de sitio(m) para los diferentes ambientes estudiados .....	21
<b>Cuadro 7.</b> Parámetros ajustados y estadísticos descriptivos del modelo de Chapman-Richards. ....	22
<b>Cuadro 8.</b> Bondad de ajuste ( $R^2$ ) y error cuadrático medio (CMError) del modelo. ....	23

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Imagen satelital donde se observa el casco del establecimiento “Las Guindas” y las plantaciones que fueron motivo de la investigación. Extraída de Google Earth el: 06/06/2016. ....	7
<b>Figura 2.</b> Ladera alta, con afloramiento rocoso. ....	8
<b>Figura 3.</b> Asociación de valle y ladera baja. ....	9
<b>Figura 4.</b> Polígonos delimitan rodales y los puntos marcan la posición de las parcelas.....	10
<b>Figura 5.</b> Apeo .....	12
<b>Figura 6.</b> Marcado de altura de corte .....	12
<b>Figura 7.</b> Corte de trozas. ....	13
<b>Figura 8.</b> Obtención de rodelas. ....	13
<b>Figura 9.</b> Marcación de anillos.....	15
<b>Figura 10.</b> Cantidad de árboles por clase diamétrica para cada sitio. ....	17
<b>Figura 11.</b> Distribución de los sitios en el área de estudio.....	19
<b>Figura 12.</b> Altura observada vs. altura estimada para los pares de datos de cada sitio. ....	23
<b>Figura 13.</b> Curvas de Índice de Sitio para <i>Pinus elliottii</i> . La línea vertical indica el valor de Índice de Sitio a la edad de referencia (16 años). ....	24

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>	<b>1.</b>	Planilla de relevamiento utilizada para tomar los datos de DAP, estado de los individuos, altura de los árboles dominantes, posición cardinal de la parcela y marco de plantación.....	32
<b>Anexo</b>	<b>2.</b>	Medición de diámetros de anillos en árboles de la misma edad en posición de valle (a), ladera baja (b) y ladera alta (c).....	33
<b>Anexo</b>	<b>3.</b>	Altura vs. Diámetro de árbol de la misma edad en posición de valle (a), ladera baja (b) y ladera alta (c).....	36
<b>Anexo</b>	<b>4.</b>	Altura vs. Edad de árboles de la misma edad en posición de Valle (a), Ladera baja (b) y Ladera alta.....	39

## INTRODUCCION

La amplia diversidad de climas, suelos y especies, la abundante disponibilidad de tierras aptas, el marco jurídico propicio para las inversiones forestales, los bajos costos de producción y las altas tasas de crecimiento de ciertas especies, ofrecen ventajas especiales para la implantación de bosques cultivados en Argentina (Beale y Clodoveo Ortiz, 2013)

Según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, (2011), 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, siendo las más importantes *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (Beale y Clodoveo Ortiz, 2013).

Al sur-oeste de la provincia de Córdoba, las Sierras de Comechingones ocupan una superficie de alrededor de 300.000 ha, con más del 80% de sus paisajes dominados por ecosistemas herbáceos, denominados pastizales, que constituyen el recurso natural básico para la productividad animal bovina y caprina. A mediados del siglo pasado el marco legal permitió el remplazo de pastizales por plantaciones de pino (*Pinus elliottii*, *P. taeda* y *P. radiata*), siendo *P. elliottii* la especie con mayor desarrollo en la región. Esto se debe a que esta especie presenta gran adaptabilidad, dado que soporta satisfactoriamente los extremos de temperaturas, lo que la convierte en una especie adecuada para ser plantada en las altitudes serranas (Dimitri, 1977; Cantero, 1999; Plevich *et al.*, 2002; Rebottaro y Cabrelli, 2007). Además, su madera presenta una gran variedad de usos, entre los que se destacan el aserrado, la industria papelera y la producción de tableros (SAGyP, 1999).

En la actualidad, hay alrededor de 20.000 ha de plantaciones con escaso o nulo manejo silvícola. Si bien el desarrollo de la actividad forestal en la Sierra de Comechingones consistió principalmente en la implantación de *Pinus elliottii*, la información disponible acerca de la productividad de los rodales es muy limitada. Ante esta situación surge la necesidad de generar información que permita establecer las pautas para un correcto manejo de las plantaciones (Zupán, 2013). Sabiendo que cualquier planificación de la producción forestal debe involucrar la predicción del rendimiento futuro (Meyer *et al.*, 1961), resulta paradójico que, en los diferentes sitios de la región, se desconozca el potencial productivo de la especie más cultivada.

La producción de madera en una plantación podría explicarse por varios factores: el clima, la topografía, la fertilidad del suelo, el suministro de agua, la densidad de la madera y los tipos funcionales de los árboles entre otras (Henry *et al.*, 2010). De las características mencionadas, aquellas que definen las condiciones del ambiente, son las que, combinadas, constituyen la calidad de estación o de sitio (Diéguez Aranda *et al.*, 2009), que se define

como la capacidad que tiene un área determinada para el crecimiento de una especie forestal, de acuerdo a las condiciones ambientales que esta ofrece, crezcan o no árboles sobre ella (Davis *et al.*, 2001; Assmann, 1970; Bengoa, 1999).

Según Donoso (1992), desde el punto de vista forestal el sitio es un área de tierra que, junto a los factores climáticos, del suelo y bióticos constituyen su medioambiente y, en conjunto, determinan la capacidad del área para desarrollar árboles u otras leñosas forestales. Gastó, *et. al.* (1990) define al sitio como un ecosistema que, como producto de la interacción de factores ambientales, engloba un grupo de suelos o áreas abióticamente homologas, que requieren un determinado manejo y presentan una productividad potencial similar.

Para evaluar la calidad de estación o de un área determinada, lo ideal sería medir la producción total al final del ciclo (de la misma manera que en otros cultivos), pero en la producción forestal esto no siempre es posible, ya que los ciclos productivos son en general largos y la toma de datos para calcular el volumen producido de madera suele ser dificultosa (Diéguez Aranda *et al.*, 2009). Es por ello que, en muchos casos, la calidad de estación debe ser medida indirectamente a través de factores estacionales intrínsecos (estimación basada en la historia de la producción, en datos del crecimiento medio máximo o en datos de la altura del rodal) o extrínsecos al rodal forestal (estimación por otras especies o asociaciones indicadoras, o por factores climáticos (precipitaciones medias anuales, temperaturas, vientos, etc.), edáficos (profundidad efectiva, rocosidad en superficie, influencia de napa, etc.) y/o topográficos (pendientes, solana, influencia de agua de otras áreas, etc.) (Ortega y Montero, 1988).

Entre los factores intrínsecos, el ritmo de crecimiento en altura de los árboles dominantes es un muy buen indicador de la calidad del sitio, dado que estos árboles crecen con escasa competencia (Assmann, 1970). Tal es así, que, para la mayoría de las especies, la producción potencial en volumen y el crecimiento en altura están positivamente correlacionados (Diéguez Aranda *et al.*, 2009; Ortega y Montero, 1988). La utilidad práctica de dicha correlación proviene de la evidencia empírica, que indica que el patrón de crecimiento en altura de los árboles de mayores dimensiones en masas regulares (correspondientes a las clases diamétricas dominante y codominante) está poco afectado por la densidad del rodal y por las cortas intermedias efectuadas, dentro de unos límites moderadamente amplios de espaciamiento que dependen de la especie (Clutter *et al.*, 1983; Assmann, 1970). Es por ello que los modelos de crecimiento empleados para la planificación silvicultural y la predicción de la producción bajo diferentes esquemas silvícolas, frecuentemente emplean las funciones de crecimiento en altura dominante como funciones directrices o directoras del resto de las funciones que luego son aplicadas en el manejo forestal, lo cual refleja su importancia (Attis Beltrán *et al.*, 2015).

La forma más habitual de referenciar la calidad de estación en rodales regulares es utilizando el denominado índice de sitio (IS), que se define como el valor de la altura dominante a una determinada edad base o de referencia (Diéguez Aranda *et al.*, 2009; Ortega y Montero, 1988; Vásquez y Ugalde, 1995). Si bien en la mayoría de los casos esta edad se elige de forma arbitraria, en la práctica se recomienda que sea posterior a la etapa de crecimiento exponencial del rodal (edad madura), y que al mismo tiempo sea inferior a la edad de la mayoría de los rodales bajo estudio, de manera de poder utilizar la mayor cantidad de información posible para la estimación del IS (Wabo, 2002).

Chaves y Fonseca, (1991) han demostrado que existe una correlación positiva entre el índice de sitio y la forma del terreno, la pendiente y el sentido de exposición de la misma. Estos autores afirman que a medida que la pendiente aumenta, disminuye el índice de sitio. Así mismo, postulan que la pendiente y la forma del terreno no influyen directamente sobre el crecimiento, pero condicionan a otros factores que pueden influir sobre los procesos fisiológicos, como: el desplazamiento del agua dentro y fuera del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la cantidad de horas de insolación directa (que depende de la orientación o exposición de la pendiente), entre otros (Tschinkel, 1972; Quirós, 1998). Por lo tanto, una clasificación previa de los sitios de acuerdo a estos factores podría facilitar el proceso de construcción de las curvas de calidad de estación y permitiría definir con mayor precisión los límites y la superficie de cada sitio.

A partir de las mediciones de altura de los rodales de una determinada especie que crecen en una misma zona geográfica, se puede construir un conjunto de curvas que muestran el patrón de crecimiento en altura dominante. Este conjunto de curvas, identificadas por su valor de índice de sitio, constituyen lo que se conoce como familia de curvas de calidad de estación (Diéguez Aranda *et al.*, 2009). Las familias de curvas de altura dominante, expresadas a partir de una función matemática, pueden ser proporcionales entre sí (anamórficas) o bien describir patrones particulares para cada clase de sitio (polimórficas). En el primer caso, la relación entre las alturas de dos curvas distintas es constante para todas las edades, mientras que, en el segundo caso, no existe la proporcionalidad anteriormente mencionada (Clutter *et al.*, 1983; Wabo, 2002). Torres Rojo (2001) comenta que, desde el inicio del uso de las curvas de calidad de sitio como medida de la productividad de los terrenos forestales, se desató un debate en torno a la conveniencia de la construcción de curvas anamórficas o polimórficas. Se ha señalado que las curvas anamórficas se asemejan al comportamiento teórico esperado, pero que muchas veces llevan a la obtención de resultados incoherentes o dispares, ligados a una inadecuada modelización de la variabilidad de los datos edad-altura, ya que estos métodos consideran a las curvas de calidad como una familia univariante (Bengoa, 1999). La evidencia empírica indica que las curvas de calidad de sitio

tienen más bien un carácter multivariante, por lo que el crecimiento en altura de varias especies ajusta mejor a curvas de tipo polimórfico (Newnham, 1988; Ker y Bowling, 1991; Stansfield *et al.*, 1991; Goelz y Burk, 1992; Payandeh y Wang, 1994).

Lappi y Bailey, (1988) fueron los primeros en modelar la relación altura-edad partiendo del supuesto de que la función de crecimiento no tiene un solo parámetro variante, sino que responde a dos o más parámetros variables. Estos autores recomiendan construir distintas familias de curvas de calidad para distintos “tipos de suelos” o para distintos “tipos de hábitat”, partiendo de la modelización individualizada de cada parcela (Wabo, 1999). De esta manera se construyen curvas polimórficas, ya que al individualizar las parcelas y luego agruparlas por tipo de suelo o hábitat se pierde la proporcionalidad que existiría entre las curvas si se tomaran todas las parcelas en conjunto y se analizara solo la relación edad-altura. Como consecuencia, las curvas de calidad de sitio resultantes tienen parámetros diferentes de acuerdo al tipo de sitio, lo que aumenta la precisión de las predicciones (Bengoia, 1999).

Para la elaboración de las curvas, se puede partir de la información obtenida de las mediciones de edad y altura dominante en parcelas temporales o en diferentes inventarios en parcelas permanentes, o bien de la reconstrucción de patrones de crecimiento en altura de árboles dominantes a través del tiempo (edad) por medio del análisis fustal (Diéguez Aranda *et al.*, 2009). Entre los métodos mencionados, el método de análisis del tronco o fuste (análisis fustal) permite obtener información del crecimiento pasado, sin necesidad de haber realizado mediciones (inventarios) año a año. Este método consiste en la medición y recuento de los anillos que aparecen en la madera, a partir del apeo y seccionado de los árboles para la obtención de rodelas (secciones transversales) a diferentes alturas del fuste (Imaña y Encinas, 2008).

La mayoría de los árboles de las zonas templadas presentan anillos de crecimiento fácilmente detectables (Gené *et al.*, 1993). La estructura de los anillos de las coníferas puede describirse considerando dos partes, que se diferencian por la anchura de las paredes celulares de las traqueidas, la dimensión del diámetro celular en sección transversal y el desarrollo temporal del anillo. Estas dos partes son las maderas temprana y tardía, muchas veces mal llamadas maderas de “primavera” y “verano“, respectivamente. La madera temprana es menos densa en promedio que la tardía, se forma antes pero no necesariamente en primavera (Kaennel y Schweingruber, 1995) y está compuesta por traqueidas anchas con paredes estrechas en sección radial. La madera tardía es más oscura y densa que la temprana ya que está formada por células más estrechas cuyas paredes anchas acumulan lignina. La anchura del anillo es resultado del número y del tamaño de las células añadidas durante el período de crecimiento (Camarero *et al.*, 1997; Gené *et al.*, 1993). Esta diferenciación de

tejidos es observable a simple vista, y permite determinar la edad del árbol y medir su crecimiento en cada año.

El número de anillos de crecimiento que se contabilizan en una rodela depende de la posición en el fuste desde donde dicha muestra fue extraída, siendo menor a medida que las rodela son cortadas en posiciones más cercanas al ápice (Carpi, 2012). La explicación de este fenómeno se basa en los meristemas que originan el crecimiento en los árboles, donde el meristema apical (crecimiento primario) genera un crecimiento de tipo longitudinal y el cambium provoca los crecimientos en diámetro (crecimiento secundario, nuevos anillos) (Valla, 1979). En ese sentido, cada año los árboles crecen tanto en diámetro como en altura, formando un anillo continuo desde la base hasta el ápice. El crecimiento en altura para un año determinado se visualiza en el fuste como el momento donde el diámetro del anillo de crecimiento tiende a cero (desaparece). Esta altura puede ser calculada a partir de ecuaciones empíricas que relacionen los diámetros de cada anillo de crecimiento (identificados en la rodela desde afuera hacia adentro) con la altura a la que fue extraída cada rodela, obteniéndose el crecimiento en altura de cada año al igualar el diámetro del anillo a cero (Fiandino, 2013).

El propósito de este trabajo final de grado es construir curvas de calidad de estación (índice de sitio) a partir del análisis de la dinámica del crecimiento en altura de los árboles dominantes de plantaciones forestales establecidas en el campo de docencia y experimentación Las Guindas, en la Sierra de Comechingones del sur de Córdoba. Estas curvas serán el primer paso hacia elaboración posterior de tablas de producción, que permitirán predecir los rendimientos potenciales de la especie *Pinus elliottii* en el área bajo estudio.

### Objetivo general

Construir curvas de calidad de sitio para rodales de la especie *Pinus elliottii* en la Sierra de Comechingones, Córdoba.

### Objetivos específicos

- Definir el tamaño muestral mínimo que permita estimar la altura media de los árboles dominantes de los rodales bajo estudio.
- Calcular el incremento anual en altura de los árboles dominantes a partir de técnicas de análisis fustal.
- Ajustar funciones que permitan la construcción de las curvas de calidad de sitio para los rodales bajo estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### El área de estudio

El trabajo se desarrolló en el campo de docencia y experimentación Las Guindas, perteneciente a la Universidad Nacional de Río Cuarto, ubicado a los 32° 35' 16.8" LS y 64° 43'45.42" LO, a 1000 m.s.n.m y a 14 Km al N de la localidad de Alpa Corral, Dpto. Calamuchita, Córdoba, Argentina.

El campo Las Guindas posee 150 ha de plantaciones de *Pinus elliottii* con escaso o nulo manejo, donde se desconocen el crecimiento y la producción de los rodales. Dentro de esta superficie, se trabajó únicamente sobre 93 hectáreas, donde los rodales fueron implantados en densidades similares a la media regional (más de 1000 plantas por ha) (Fig. 1).

Las plantaciones se ubican en las siguientes unidades cartográficas: EOli-2 y MJli-5. La primera presenta en mayor proporción suelos de laderas quebradas (Udorthent lítico paralítico, algo someros (menos de 50 cm de profundidad), moderadamente pobre en materia orgánica y muy fuertemente inclinado). En cuanto a la segunda unidad, se encuentran principalmente suelos de lomas (Hapludoles lítico paralítico, poco profundos (75-50cm), pobre en materia orgánica y con fuertes inclinaciones) y suelos de concavidades y cañadas (Argiudol lítico, algo someros (50-75 cm. de profundidad), moderadamente bien provisto de materia orgánica, muy fuertemente inclinado) (Jarsun *et al.*, 2006). Esta diferencia de unidades cartográficas dentro del área de estudio, genera diferentes potenciales productivos para el crecimiento de las masas forestales, haciéndose necesario la diferenciación de estos ambientes para la toma de datos.

Las características climáticas de la región presentan un régimen irregular de distribución de las precipitaciones de tipo monzónico y con un valor medio anual de precipitaciones de 1007 mm. La temperatura media anual es de 14,7 °C, siendo julio el mes de menor temperatura media (7,7 °C) y enero el mes de mayor temperatura media (21,1 °C). La temperatura máxima media anual registrada es de 22,3 °C, mientras que la mínima media anual es de 8,4 °C; lo que da como resultado una amplitud térmica media anual de 13,9 °C. La temperatura extrema más baja registrada corresponde al mes de julio (-13,7 °C), mientras que la más alta al mes de enero (42,3 °C) (Rivarola *et al.*, 2015).

La red de drenaje natural se caracteriza por cursos de agua bien definidos y pequeños cauces de arroyo, presentando erosión de tipo lineal por el tipo de granulometría del material originario, con formación de cárcavas de aspecto vertical y fondo plano. Los ríos que atraviesan la región son el Alpa Corral, Río de los Sauces y Quillinzo (INTA, 1994).



**Figura 1.** Imagen satelital donde se observa el casco del establecimiento “Las Guindas” y las plantaciones que fueron motivo de la investigación. Extraída de Google Earth el: 06/06/2016.

#### Inventarios y tamaños muestrales

Para poder comenzar con la recopilación de información para la confección de las curvas de índice de sitio, fue necesario clasificar los rodales del establecimiento para organizar los muestreos a campo. Se procedió a realizar una subdivisión de los rodales, de acuerdo a la información disponible de la solicitud de subsidios que se presentó para acceder a los beneficios de la Ley 25.080. Esta información, junto a los límites artificiales (caminos, pircas) observadas en una imagen satelital de la plantación, permitió organizar la plantación en 3 subunidades como puede observarse en la Fig. 4.

Dentro de cada una de estas subunidades se realizó un muestreo al azar estratificado. Este método consiste en la división de la población en partes o estratos (grupos de unidades de muestreo) homogéneos internamente, de acuerdo a la o las características que se van a estudiar (en este caso, la altura de los árboles dominantes). La variabilidad dentro de cada uno de los estratos debía ser inferior a la variabilidad total de la población sin estratificar (Gaillard de Benítez y Pece, 2011).

La estratificación se realizó siguiendo lo postulado por Chaves y Fonseca (1991), considerando la pendiente, la posición en el terreno y la presencia de rocosidad. Los tipos de sitios en que se dividieron los rodales fueron:

1. Valle: áreas asociadas a cursos de agua permanentes o temporarios, con bajas pendientes y ausencia de afloramientos rocosos.

2. Ladera baja: áreas asociadas a valles, pero sin influencia de cursos de agua permanentes o temporarios, con pendientes medias y escasa presencia de afloramientos rocosos (Fig. 3).
3. Ladera alta: áreas asociadas a laderas bajas, con marcadas pendientes y abundante presencia de afloramientos rocosos (Fig. 2)

Esta estratificación queda conformando un gradiente de pendientes, en donde los valles son los que menores pendientes presentan, las laderas bajas presentan pendientes intermedias y las laderas altas son las de mayores pendientes.

Se confeccionó un mapa de pendientes de la plantación, utilizando como base modelos digitales de elevación (DEM), con el fin de identificar de manera remota los estratos en donde debían ser ubicadas las parcelas de muestreo y, al mismo tiempo, cuantificar su superficie. Estos modelos se construyeron a partir de imágenes satelitales (descargadas de la web del Instituto Geográfico Nacional), las cuales fueron procesadas con el software libre QGis (Quantum GIS, 2011).



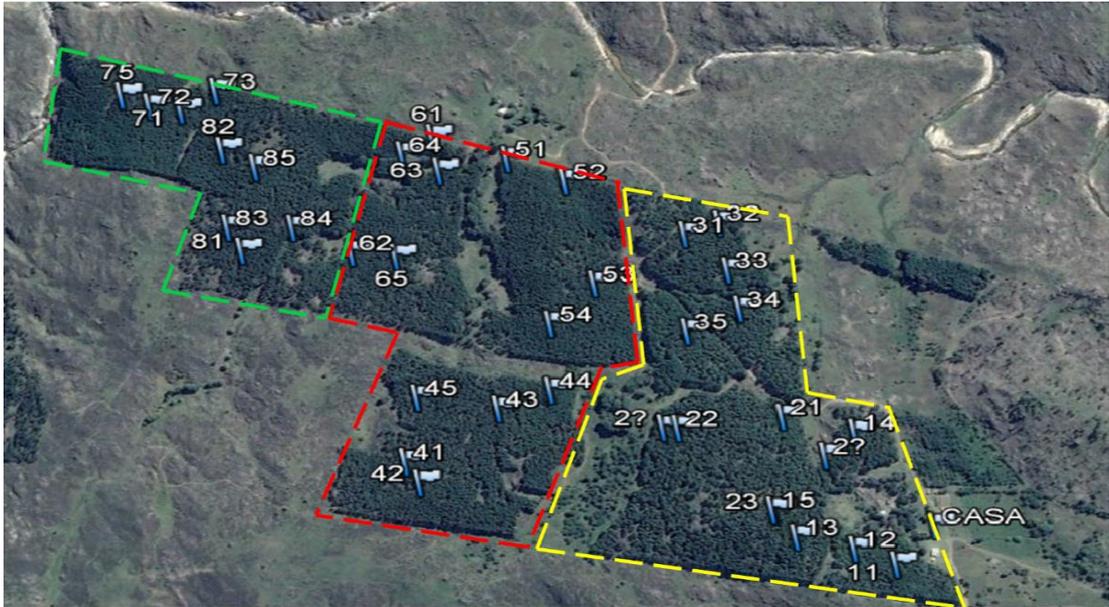
**Figura 2.** Ladera alta, con afloramiento rocoso.



**Figura 3.** Asociación de valle y ladera baja.

Una vez realizada esta estratificación, se procedió a establecer las parcelas de muestreo, las cuales tenían un tamaño de 324 m<sup>2</sup>, en donde cada una comprendía a 36 árboles con un marco de plantación de 3 x 3. Las parcelas fueron delimitadas con una cinta, con la cual se marcaron los árboles de los extremos de la parcela, para facilitar la posterior distinción, y dentro de estas se marcaron los 5 árboles de mayor diámetro. Cada una de las parcelas fue georreferenciada con GPS y clasificada de acuerdo al estrato al que pertenecía (Valle, Ladera baja o Ladera alta).

Se establecieron un total de 40 parcelas de muestreo, que suman una superficie de 1,3 Ha., lo que representa un 1,4% del total de la superficie forestada (93 ha.). En la Fig. 4 se puede observar la distribución de las parcelas en la plantación forestal y la división de la plantación en rodales.



**Figura 4.** Polígonos delimitan rodales y los puntos marcan la posición de las parcelas

En cada una de las parcelas se les midió a todos los árboles el diámetro a la altura del pecho (DAP) con cinta dendrométrica y se contó la cantidad de árboles muertos y fallas de plantación. Con los valores de DAP se clasificó a los árboles por grupos o clases diamétricas siguiendo la metodología propuesta por Vita Alonso (1978), quien propone categorizar a los árboles a partir de la clase de copa, definiendo cuatro grupos o clases diamétricas: dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos. Una vez realizada esta clasificación se realizó la medición de la altura, por medio del hipsómetro de SUUNTO, a cinco árboles pertenecientes a las clases dominante o codominante.

En anexo 1 puede observarse una de las planillas de campo, en donde se recopiló esta información. Además, en esta se realizó un croquis de la parcela donde se identificó la posición de la parcela (según los puntos cardinales), y se numeraron los árboles. Otros datos que se recopilaron fueron el marco de plantación, el estado sanitario y el grado de tortuosidad de los fustes (grado de desviación del fuste respecto de la vertical y el tercio del árbol donde se visualizaba el defecto).

Con los datos de los muestreos de las parcelas establecidas en cada uno de los estratos, se procedió a calcular el tamaño muestral ( $n$ ) definitivo según la fórmula (Gaillard de Benítez y Pece, 2011):

$$n = \frac{t^2 \sum_{j=1}^M P_j * S_j^2}{E^2} \quad (1)$$

Dónde:

$n$  = tamaño muestral

$t$  = valor t estudent

**M**= número de estratos

**P<sub>j</sub>**= proporción de cada estrato

**S<sub>j</sub><sup>2</sup>**= varianza muestral del estrato

**E<sup>2</sup>**= error de muestreo

La varianza muestral de cada estrato se calculó con la siguiente formula (Gaillard de Benítez y Pece, 2011):

$$S_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} (x_{yj} - x_j)^2}{n_j - 1} \quad (2)$$

Dónde:

**x<sub>yj</sub>**: valor de muestreo

**x<sub>j</sub>**: promedio de la muestra

**n<sub>j</sub>**: número de unidades de muestreo del estrato

La proporción del estrato muestral se calculó con la siguiente formula (Gaillard de Benítez y Pece, 2011):

$$P_j = \frac{n_j}{n} \quad (3)$$

Dónde:

**n<sub>j</sub>**: número de unidades de muestreo del estrato

**n**: número total de unidades de muestreo

#### Incremento anual en altura

Una vez definido el número de unidades de muestro representativas de cada estrato, se apearon en total 24 árboles dominantes, de parcelas ubicadas en los diferentes estratos. Para la selección de estos se consideró que los fustes fueran rectos, que se encontraran en un correcto estado sanitario y que su posición en la plantación facilitara el apeo. Una vez apeados, se realizó el desrame del fuste para facilitar el trabajo, y se midió la altura total de cada uno de los árboles. Luego se marcaron los lugares de donde se iban a extraer las rodela, cuidando de que el corte no coincidiera con un verticilo de ramas, dado que las marcas dejadas por los nudos dificultan el análisis fustal.

Las primeras tres rodela fueron extraídas a 0,3 m., 1,3 m., 2,3 m. en todos los árboles, mientras que las restantes se extrajeron cada uno, dos o tres metros de acuerdo a la altura total del árbol y la cercanía al ápice. Esto se debe a que en la parte central del fuste la extracción de rodela poco distanciadas no aporta información valiosa adicional y, por lo

tanto, no se justifica el trabajo extra que supone extraerlas cada un metro. A cada una de las rodelas se les marcó el norte de manera de tener una referencia al momento de comenzar con las mediciones de los anillos de crecimiento. En las Figs. 5, 6, 7 y 8 se puede observar cómo fue el proceso para la extracción de las rodelas.



**Figura 5.** Apeo



**Figura 6.** Marcado de altura de corte



**Figura 7.** Corte de trozas.



**Figura 8.** Obtención de rodelas.

Las rodelas fueron rociadas con solución de agua e hipoclorito de sodio al 25% v/v. Las rodelas pertenecientes a cada árbol se guardaron en bolsas separadas e identificadas con el número de parcela a la que pertenecían. Luego, se dejaron secar a temperatura ambiente y se lijaron con una lijadora de banco, lo que permitió mejorar la visibilidad de los anillos de crecimiento.

El análisis fustal se realizó en el laboratorio, y comenzó con el fechado de los árboles para corroborar que la edad de referencia que se tenía de los rodales coincidiera con la de los árboles muestreados. El mismo se realizó a partir de la rodela ubicada a los 0,3 m. Se agrupó a los árboles de acuerdo a la división que se había realizado por edad de los rodales y se procedió a corroborar la distribución de edades (y de esta manera comprobar que existiese coetaneidad dentro de los rodales).

Una vez fechados los árboles se procedió a realizar la medición de los anillos de crecimiento siguiendo una metodología similar a la propuesta por Fiandino (2013):

1. Humedecer las rodela con agua para mejorar la identificación de los anillos,
2. Marcar los anillos de crecimiento de manera clara sobre las rodela en dos direcciones (N-S y E-O), sacar una foto a la rodela junto a una regla graduada en milímetros, identificando al árbol al que pertenece.
3. Procesar la imagen obtenida con el software ImageJ Ops (Rueden *et. al.*, 2016) y medir el diámetro de los anillos en las dos direcciones marcadas, promediando los diámetros medidos.

La modificación al método propuesto por Fiandino (2013), fue que las mediciones se realizaron digitalmente. Dicha modificación tiene sus razones en que la madera de *Pinus elliottii* es muy propensa a formar hongos cuando esta húmeda y a quebrarse al secarse, entonces, de esta manera se aseguró tener una medición con un excelente estado de la rodela. Otra de las ventajas de este tipo de medición digital es la rapidez con la que se pudo procesar la información.



**Figura 9.** Marcación de anillos.

Con los datos de los diámetros de los anillos (obtenidos a partir de las diferentes secciones del fuste) y la altura a la que fue extraída cada rodela, se procedió a determinar la altura a la que cada uno de los anillos cesaba su crecimiento (momento en el que el diámetro del anillo es igual a cero) por medio de ecuaciones empíricas (Fiandino, 2013) (Fig. 9).

#### Construcción de las curvas de índice de sitio

El primer paso en el desarrollo del modelo fue fijar una edad de referencia a la cual se determinará el índice de sitio. Esta edad de referencia, en lo posible, debía ser cercana a la edad de rotación o, en todo caso, una edad que comprendiera a los rodales menos longevos y que fuera a la vez un estimador fiable de la altura a otras edades (Álvarez Gonzales *et al.*, 2004), bajo estas premisas se determinó que esta fuera de 16 años. Se definió el índice de sitio (IS) de cada parcela a partir del valor promedio de la altura de los árboles dominantes a la edad de referencia y se agruparon aquellas parcelas que presentaron IS similares.

Para corroborar la agrupación de las parcelas de acuerdo al índice de sitio se contrastó con el mapa de pendientes de la plantación, el cual fue dividido en tres categorías de acuerdo al rango de pendientes. Los rangos de pendientes que corresponden a cada sitio fueron de menos del 9% para el Valle, entre el 9% y el 15% para la Ladera baja y más del 15% para la Ladera alta.

El modelo que se utilizó para parametrizar y construir las curvas de calidad de estación fue el de Chapman-Richards modificado para *Pinus radiata* (Diéguez Aranda *et al.*, 2009). En este caso, se trabajó con IS predefinidos (Ortega y Montero, 1988), por lo que la forma general de la ecuación es:

$$H_0 = IS \cdot \left( \frac{1 - \exp(-b_1 \cdot t_0)}{1 - \exp(-b_1 \cdot t_r)} \right)^{b_2} \quad (4)$$

Donde,  $H_0$ : altura total (m) al tiempo  $t_0$ ;  $t_0$ : edad (años); IS es el índice de sitio a la edad de referencia de  $t_r$  (16 años); y  $b_1$  y  $b_2$ : parámetros a ser ajustados de la función (Diéguez Aranda *et al.*, 2009).

Esta función cumple con las principales características que deben tener las curvas de crecimiento: forma sigmoidea, punto de inflexión que se puede determinar matemáticamente y crecimiento asintótico cuando la edad tiende a infinito (Attis Beltrán *et al.*, 2015). Además, da la posibilidad de generar curvas polimórficas, que puedan representar una dinámica de crecimiento particular para cada sitio (Diéguez Aranda *et al.*, 2009).

Luego del ajuste de los parámetros de la ecuación, se evaluó la bondad de ajuste y las capacidades predictivas del modelo a través de los siguientes estadísticos: coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cuadrado medio del error (CMError), el nivel de significancia y el error estándar de la estimación de los parámetros (E.E.) (Attis Beltrán *et al.*, 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Inventarios y tamaños muestrales

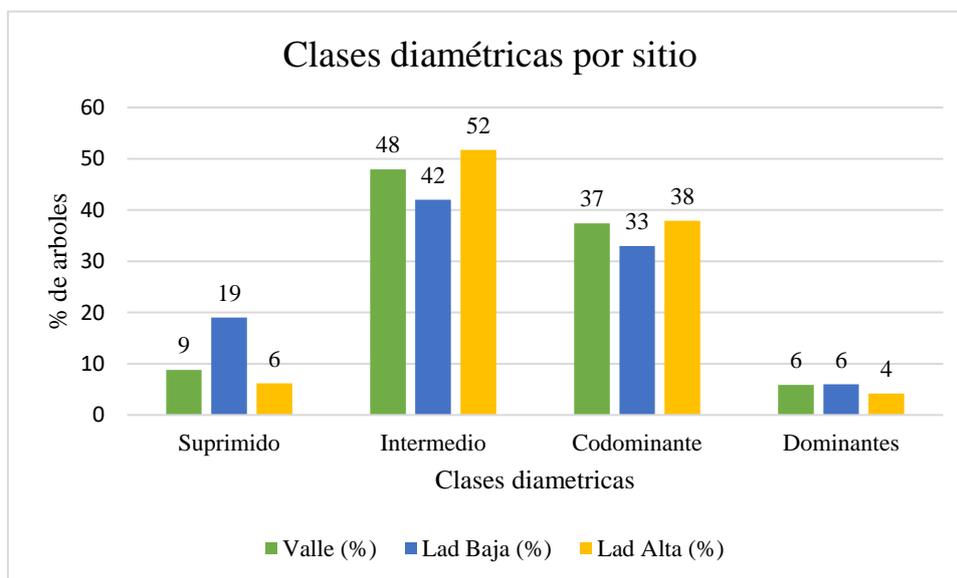
Según Freese (1967), las muestras cuestan dinero, como así también lo hacen los errores. Por lo tanto, el objetivo en la planificación de un muestreo debe ser tomar suficientes observaciones (ni más, ni menos) para obtener la precisión deseada.

Los valores de DAP mostraron poca variabilidad (en cada estrato) en el inventario realizado inicialmente. Esto generó que la cantidad de unidades de muestreo necesarias para representar la población bajo estudio fuera 24 (calculado a través de la Ecuación 1), lo que es menor a la cantidad de parcelas inventariadas que fueron 40. Es por ello que para el análisis fustal, se aparearon 24 árboles dominantes, cada uno de ellos de una parcela diferente.

En el Cuadro 1 se puede observar la distribución de los árboles en clases diamétricas en cada sitio (posición topográfica).

**Cuadro 1.** Rangos de DAP por clase diamétrica y por posición topográfica.

	DAP (cm.)		
	Valle	Ladera baja	Ladera alta
Dominantes	39,1 - 32,9	42,6 - 36	40,7 - 33,2
Codominantes	32,9 - 26,7	36 - 29,4	33,2 - 25,7
Intermedios	26,7 - 20,5	29,4 - 22,8	25,7 - 18,3
Suprimidos	20,5 - 14,3	22,8 - 16,2	18,3 - 10,8



**Figura 10.** Cantidad de árboles por clase diamétrica para cada sitio.

La mayoría de los árboles pertenecen a las clases intermedias y codominantes independientemente del sitio. En general la distribución en cada uno de las categorías muestra una cierta homogeneidad a pesar del sitio al que pertenezcan, salvo el caso de la categoría suprimidos, en donde en la ladera baja alcanza una mayor proporción de estos,

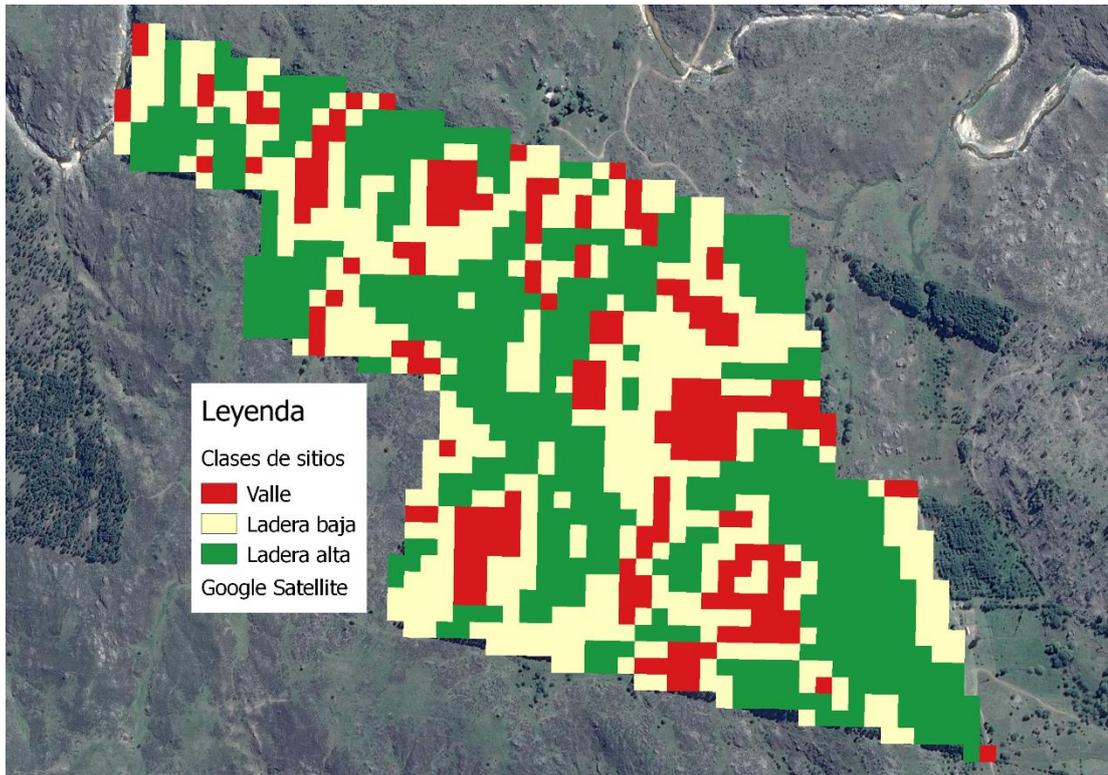
respecto a las demás posiciones topográficas (Fig. 10). La diferenciación clara en estas cuatro categorías es típica de rodales coetáneos que no han recibido ningún tipo de intervención (clareos, raleos), lo que genera competencia entre los individuos por agua, luz y nutrientes, y produce esta diferenciación entre copas, donde los individuos más vigorosos ocupan el nivel superior y los más débiles el nivel inferior (Vita Alonso, 1978; Gamundi, 1998). Los individuos suprimidos finalmente mueren, siendo esta una importante pérdida de madera.

**Cuadro 2.** Mortalidad por edad y por sitio

Sitio	Mortalidad (%)		
	Total	Por edad	
		27	20
Valle	32	44	29
Ladera Baja	35	50	19
Ladera alta	41	57	30

En el inventario realizado, se computaron también los árboles muertos (Cuadro 2). Si no se considerase la edad de los árboles computados existe diferencia de mortalidad entre sitios, siendo las Laderas altas las que mayor mortalidad presentan (41%) y disminuyendo la mortalidad para los sitios de Ladera baja (35%) y Valle (32%). Al considerar la edad, puede observarse como naturalmente a medida que la edad de la plantación aumenta, se incrementa la mortalidad, manteniéndose las diferencias de acuerdo al sitio. Si se analiza la edad y el sitio en conjunto, se puede ver que, en el caso de la Ladera baja, la mortalidad a los 20 años es menor que la del Valle, pero que luego a los 27 años esta aumenta y supera a la del Valle. La explicación de esto podría consistir en que la Ladera baja es el sitio que mayor proporción de árboles suprimidos presenta a los 20 años, muchos de ellos próximos a morir, lo que indica niveles de competencia que terminarían acrecentando el autoraleo, lo que explicaría el aumento de la mortalidad registrado a los 27 años (Cuadro 2).

Finalmente, los árboles seleccionados para el apeo se muestran en la Tabla 3. Las distintas cantidades de árboles entre sitios se debe a la diferente superficie que ocupa cada uno de los sitios (Fig. 11).



**Figura 11.** Distribución de los sitios en el área de estudio.

**Cuadro 3.** Árboles seleccionados para el apeo por rodal y por sitio.

Grupo de rodales	Sitio	Cantidad
1	Valle	4
	Ladera baja	5
	Ladera alta	2
2	Valle	1
	Ladera baja	3
	Ladera alta	3
3	Valle	1
	Ladera baja	3
	Ladera alta	2
Total		24

#### Incremento anual en altura

De los 24 árboles muestreados se extrajeron un total de 233 rodelas; en el Cuadro 4 se detalla a que altura fue extraída cada una de estas en cada uno de los árboles apeados.

**Cuadro 4.** Altura a la que se extrajeron las rodela en cada árbol.

PARCELA/RODELA	Altura de extracción de rodela (m.)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.1	0,3	1,3	3,3	5,3	7,3	9,3	11,3	13,3	13,3	14,3	15,3	
1.2	0,3	1,3	2,3	5,3	7,3	9,3	11,3	12,3	13,3	14,3		
1.4	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	14,3	15,3	16,3		
2.1	0,3	1,3	2,3	5,3	7,3	9,3	10,3	11,3	12,3	13,3		
2.2	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	14,3	15,3	16,3	17,3	
3.1	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	11,3	13,3	14,3	15,3	16,3		
3.2	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	14,3	15,3			
3.3	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	11,3	14,3	16,3	18,3	19,3	20,3	21,3
3.4	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	13,3	14,3	15,3		
3.5	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	11,3	13,3	15,3	16,3			
4.1	0,3	1,3	2,3	5,3	7,3	9,3	10,3	11,3				
4.4	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	14,3	15,3	16,3		
5.1	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	11,3	13,3	14,3	15,3	16,3		
5.3	0,3	1,3	2,3	5,3	7,3	9,3	10,3	11,3	12,3	13,3		
6.1	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	11,3	13,3	15,3	16,3	17,3		
6.3	0,3	1,3	2,3	5,3	7,3	9,3	11,3	12,3	13,3	14,3	15,3	
6.4	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	11,3	13,3	15,3	16,3	17,3	18,3	
7.1	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	14,3				
7.2	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	14,3				
7.3	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	11,3	12,3	13,3	14,3		
8.1	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	11,3	12,3	13,3			
8.2	0,3	1,3	2,3	4,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3			
8.4	0,3	1,3	2,3	5,3	8,3	10,3	12,3	13,3	14,3	15,3		
8.5	0,3	1,3	2,3	4,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3	11,3		

Como puede observarse la altura de extracción de las rodela, respeto siempre la extracción de tres rodela a 0,3; 1,3 y 2,3 metros, y luego varió de acuerdo a la altura del árbol, lo que hace que la cantidad de rodela extraídas por árbol sea, en muchos casos, diferente.

En concordancia con lo descrito por Ceballos Jiménez (2000), se diferenciaron con claridad sectores del leño que, comparativamente, crecieron más y sectores donde el crecimiento fue mínimo. Esa diferencia de crecimiento entre los tejidos del leño inicial o temprano y leño tardío, representados en las capas sobrepuestas, produjo nítidamente áreas más o menos concéntricas (anillos de crecimiento).

La región en la cual se desarrolló el ensayo presenta las características típicas de los climas templados. Es por ello, que existió un período de estrés fisiológico durante cada uno de los años, que permitió la formación de anillos bien definidos. Dichos anillos reflejaron de

manera exacta la edad de los árboles (Gené *et al.*, 1993; Imaña y Encinas, 2008; Moglia *et al.*, 2010).

En el Cuadro 5 se muestran los rangos de edades para cada grupo de rodales. El rango de edades dentro de cada uno de los rodales no tuvo una variabilidad importante (variabilidad que existe a causa de que la plantación de los rodales llevo más de un año), lo que mostro que la división realizada tuvo sentido, ya que la agrupación que se hizo dio como resultado rodales coetáneos.

**Cuadro 5.** Rango de edades a la altura del pecho halladas en el fechado de las rodelas

Grupo de rodales	Rango de edades
1	23-27
2	18-20
3	16-18

De la información obtenida se procedió a graficar el crecimiento en altura de los árboles apeados. En anexos 2 y 3, se muestran las tablas con los valores de diámetro de los anillos medidos a la altura a la que se ubicaba la rodela y luego el gráfico resultante para un árbol que crece en la posición de valle, uno de la posición de ladera baja y por último un árbol que crece en la posición de ladera alta.

En anexo 4, pueden observarse los resultados obtenidos de estimar la altura a la que cada año ceso su crecimiento.

#### Construcción de las curvas de índice de sitio

Para la construcción de las curvas de índice de sitio se debió definir la edad de referencia a la que se iba a determinar el valor de Índice de Sitio (IS), el cual como ya se menciono fue de 16 años. Con la edad de referencia establecida se procedió a determinar el valor de IS para cada una de las parcelas y posteriormente el IS promedio para cada uno de los sitios.

**Cuadro 6.** Índices de sitio(m) para los diferentes ambientes estudiados

Sitio	Medias	Desvío estándar
Valle	15,51 <sup>a</sup>	1,03
Ladera baja	13,68 <sup>b</sup>	1,33
Ladera alta	11,92 <sup>c</sup>	0,98
R <sup>2</sup>		0,58
CV (%)		9,26

Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0,05).

Se encontraron diferencias significativas en el IS entre los sitios (p-valor <0,05), lo que confirma que existe un potencial de rendimiento distinto de acuerdo al sitio en el que crezca la plantación (Cuadro 6).

De acuerdo a lo postulado por Chaves y Fonseca (1991), aún sin saber la magnitud de los índices de los sitios zonificados, se esperaba que las tendencias marcaran una jerarquía Valle, Ladera baja y Ladera alta, lo que en términos de valores medios ocurrió, sin embargo, otras variables explican también la productividad de los sitios es por ello que la pendiente explico el índice de sitio en 83 %, 75 % y 62 % de los casos según correspondiera a valle, ladera baja, y ladera alta respectivamente.

En los sitios identificados como Valle, las pendientes eran bajas, contaban con cursos de agua permanente o temporaria, buena profundidad de enraizamiento, y ausencia de pedregosidad en superficie, características que en su conjunto lo definieron como el sitio de mayor potencial productivo (IS<sub>16</sub>:15.51 m). Las Laderas bajas (IS<sub>16</sub>:13.68 m), se encontraban asociadas a Valles, con pendientes mayores, y escasa presencia de pedregosidad en superficie, pero con el aporte de agua de otras zonas (principalmente de Laderas altas); las laderas altas (IS<sub>16</sub>:11.92 m) son los sitios con mayores pendientes, menor retención de agua y con menor evolución de los suelos.

Para mejorar la capacidad de predicción, posiblemente el grado de pendiente deba ser complementado con información referida a la posición topográfica y a la exposición. Integrando estos factores se podría llegar a una mejor identificación indirecta del potencial productivo del sitio.

Luego de establecer la agrupación final de las parcelas (en base al proceso desarrollado en los párrafos anteriores) se procedió a realizar el ajuste de los parámetros de la ecuación de Chapman-Richards modificada, a partir de los pares de valores altura-edad, para cada uno de los sitios. Los parámetros de la ecuación y los estadísticos descriptivos fueron calculados con un alto nivel de significancia ( $p < 0,05$ ) (Cuadro 7).

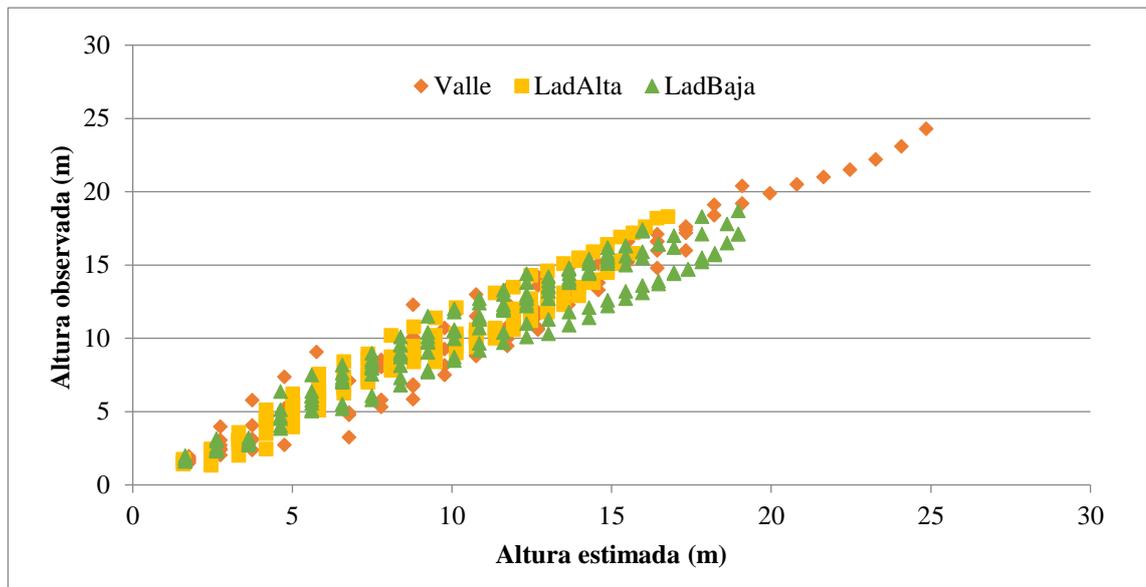
**Cuadro 7.** Parámetros ajustados y estadísticos descriptivos del modelo de Chapman-Richards.

SITIO	PARAMETROS		P-VALOR		E.E.	
	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA
Valle	0,02	1,12	0,0324	<0,0001	0,01	0,08
Ladera baja	0,06	1,25	<0,0001	<0,0001	0,0048	0,04
Ladera alta	0,05	1,15	<0,0001	<0,0001	0,01	0,07

**Cuadro 8.** Bondad de ajuste ( $R^2$ ) y error cuadrático medio (CMError) del modelo.

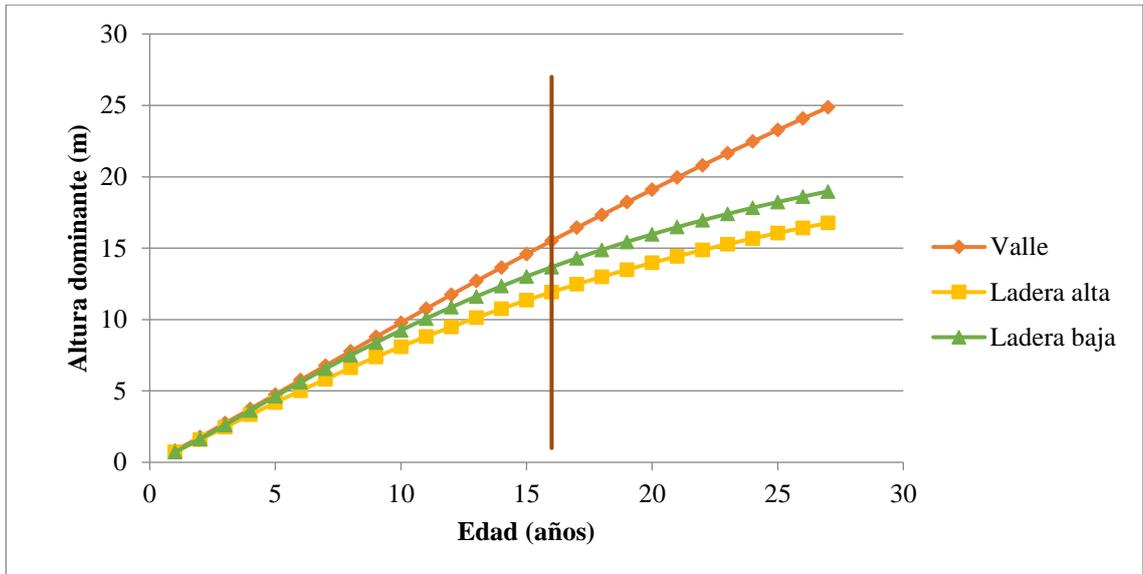
SITIO	$R^2$	CMError
Valle	0,9526	1
Ladera baja	0,9306	0,32
Ladera alta	0,9563	0,63

El valor del CMError correspondió a un 9% de la altura media en el valle (10,56 m.), 5% en la ladera baja (10,43m.) y 9% en la ladera alta (9,02 m.). Esto indica que con las curvas de calidad de estación ajustadas se comete un error medio bajo al estimar el potencial productivo de cada sitio. Los  $R^2$  estimados determinan que el nivel de ajuste de la altura observa y la estimada es alto para cada uno de los sitios (Fig. 12).



**Figura 12.** Altura observada vs. altura estimada para los pares de datos de cada sitio.

Finalmente, se ajustaron modelos de regresión no lineal para cada uno de los sitios dando como resultado tres curvas de índice de sitio que cada una presenta patrones particulares de crecimiento, ya que la variación altura-edad no fue proporcional entre los sitios (Fig. 14)



**Figura 13.** Curvas de Índice de Sitio para *Pinus elliottii*. La línea vertical indica el valor de Índice de Sitio a la edad de referencia (16 años).

Como puede observarse en la Figura 13, los sitios Ladera baja y Ladera Alta presentan más proporcionalidad entre sí, mientras que el Valle se diferencia claramente de estos dos. Estos patrones particulares para cada clase de sitio son típicos de la construcción de curvas polimórficas, las que en el caso bajo estudio permitieron predecir con buena precisión los distintos potenciales productivos de cada sitio (Clutter *et al.*, 1983). Autores que ajustaron modelos de índice de sitio de tipo polimórfico en la región Patagónica, obtuvieron errores de predicción de la altura media que variaron desde 4% hasta 16%. Los errores de predicción de los modelos ajustados en este trabajo se encuentran dentro del rango anteriormente mencionado (Martinez-Pastur *et. al.*, 1997; Ivancich *et. al.*, 2011; Andenmatten y Letourneau, 1998).

## CONCLUSIONES

Los modelos de predicción desarrollados serán de gran utilidad para la actividad forestal a nivel regional, dado que brindan información sobre la potencialidad productiva de la especie *Pinus elliottii* en los sitios más representativos de la Sierra de Comechingones, y sirven como base para el desarrollo de modelos de predicción del volumen forestal.

El muestreo del 1,4% de la superficie de la plantación fue suficiente para poder caracterizar la dinámica de crecimiento en altura de la especie. La división de los rodales por edades y estratos permitió disminuir el esfuerzo de muestreo necesario para representar a la población.

El método de estratificación utilizado demostró tener validez, dada las similitudes y coincidencias encontradas entre los mapas de pendientes, el Índice de sitio y la clasificación visual in situ. Sin dudas la productividad de los sitios responde a varios factores, algunos de ellos considerados en la primera estratificación realizada, como son: la pendiente, la pedregosidad, la capacidad para recibir o emitir escurrimientos y la profundidad del perfil.

El método de análisis fustal, es un método de una gran precisión cuando se desea obtener información del crecimiento de los árboles y no hay datos de parcelas permanentes. El hecho de poder diferenciar claramente los anillos de crecimiento, permitió la utilización del software ImageJ Ops (Rueden *et. al.*, 2016), lo cual agilizó el procesamiento de una gran cantidad de información, que de haberse procesado manualmente, hubiese requerido de una mayor inversión de tiempo.

Finalmente, los modelos de predicción desarrollados demostraron ser excelentes predictores de la calidad de estación de los sitios definidos. Sin embargo, sería conveniente realizar nuevas investigaciones en la región que permitan validar los resultados obtenidos.

## BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ GONZALEZ J. G.; M. BARRIO ANTA; U. DIEGUEZ ARANDA y A. ROJO ALBORECA. 2004. *Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación*. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela politécnica superior. Lugo, España
- ANDENMATTEN E. Y F. LETOURNEAU. 1998. *Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para pino oregón (Pseudotsuga menziesii) (Mirb.) Franco de aplicación en la región andino patagónica de las provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía*. La Plata 103 (1)
- ASSMANN, E. 1970. *The principles of forest yield study* (Pergamon Press Ltd.).
- ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. 2016. En:
  - <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>. Consultado 10/07/2017
- ATTIS BELTRAN, H.; L.M. CHAUCHARD y G. MARTINEZ PASTUR. 2015. *Curvas preliminares de índice de sitio para bosques puros y mixtos de Nothofagus alpina y Nothofagus obliqua en la Patagonia Argentina*. Bosque 36(2): 275-285
- BEALE I. y E. CLODOVEO ORTIZ. 2013. *El sector forestal argentino. Bosques implantados. Revista de divulgación técnica agrícola y agroindustrial*. ISSN 1852-7086.
- BENGOA, J.L. 1999. *Análisis de un modelo de crecimiento en altura de masas forestales. Aplicación a las masas de Quercus pyrenaica de La Rioja*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- CAMARERO, J. J.; J. GUERRERO Y E. GUTIERREZ. 1997. *Formación del anillo de crecimiento y clima: un ejemplo de modelos para Pinus uncinata Ram. Y Pynus sylvestris L. en los pirineos centrales*. Ecología, N° 11, pp. 235-254
- CANTERO J.J. 1999. *Proyecto Pastizales Serranos, bases ecológicas para su manejo*. 30 p.
- 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.

CEBALLOS JIMENEZ, R. 2000. *Los árboles, seres vivos para la ciencia*. Colegio oficial de Ingenieros de Montes, España. En:

- [www.ingenierosdemontes.org/download/arboles\\_seres\\_vivos.pdf](http://www.ingenierosdemontes.org/download/arboles_seres_vivos.pdf).

Consultado: 10/03/2018.

CHAVES E. y W. FONSECA. 1991. *Ciprés. Cupressus lusitanica Mill. Especie de árbol de uso múltiple en América Central*. Centro Agronómico Tropical para la Investigación y Enseñanza. Turrialba. Costa Rica.

CLUTTER, J.L.; J.C. FORTSON; L.V. PIENAAR; G.H. BRISTER y R.L. BAILEY. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. Krieger Publishing Company, New York.

DAVIS, L.S.; K.N. JOHNSON; P.S. BETTINGER y T.E. HOWARD. 2001. *Forest management: to sustain ecological, economic and social values*. McGraw-Hill Series in Forest Resources, New York.

DIEGUEZ ARANDA, U.; A. ALBORECA ROJO; F. CASTEDO-DORADO; J.G. ALVAREZ GONZALEZ; M. BARRIO-ANTA; F. CRECENTE-CAMPO; J.M. GONZALEZ GONZALEZ; C. PEREZ-CRUZADO; R. RODRIGUEZ SOALLEIRO; C.A. LOPEZ SANCHEZ; M.A. BALBOA-MURIAS; J.J. GORGOSO VARELA y F. SANCHEZ RODRIGUEZ. 2009. *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Lugo: Consellería do Medio Rural, Dirección Xeral de Montes.

DIMITRI, M. J. 1977. *Libro del Árbol*. Celulosa Argentina. Bs. As. 144 p.

DONOSO, C. 1992. *Ecología Forestal; el bosque y su medio ambiente*. 5ta ed. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 369 p.

FIANDINO, S.I. 2013. *Parametrización de funciones de crecimiento para Pinus elliottii del bosque comunal de la localidad de San Basilio, Córdoba, Argentina*. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Río Cuarto.

FREESE, F. 1967. *Métodos estadísticos elementales para técnicos forestales*. 1ra ed. Centro Regional de Ayuda Técnica, Agencia Para el Desarrollo Internacional, EE.UU. 105 p.

- GAILLARD DE BENITEZ, C. y M.G. PECE. 2011. *Muestreo y técnicas de evaluación de vegetación y fauna*. Universidad nacional de Santiago del Estero
- GAMUNDI G. 1998. *El raleo forestal*. En:
- <http://www.bse.com.uy/almanaque/Almanaque%201982/pdf/0%20-%20041.pdf>. Consultado: 16/03/2018
- GASTÓ, J., F. SILVA., Y F. COSIO. 1990. *Sistema de Clasificación de Pastizales de Sudamérica*. *Sistemas en Agricultura*, 9:1-92.
- GENÉ, C.; J. M. ESPELTA; M. GRACIA y J. RETANA. 1993. *Identificación de los anillos anuales de crecimiento de la encina (Quercus ilexL.)*. *Orsis* 8: 127-139.
- GOELZ, J. C. G., Y T. E. BURK. 1992. *Development of a well-behaved site index equation: Jack pine in north central Ontario*. *Can. J. For. Res.* 22: 776-784.
- HENRY, M.; A. BESNARD; W. A. ASANTE; J. ESHUN; S. ADU-BREDU; R. VALENTINI; M. BERNOUX y L. SAINT-ANDRÉ. 2010. *Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa*. *Forest Ecology and Management* 260: 1375–1388.
- IMAÑA, E. y B. ENCINAS. 2008. *Edometría Forestal*. Brasilia. Universidad de Brasil, Departamento de Engenharia Florestal Merida. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales.
- INTA. 1994. *Carta de Suelos de la República Argentina*. Hoja Alpa Corral 3366-18 y Rio de los Sauces 3366-12.
- INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL. Mapas físico políticos. En:
- <http://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>. Consultado: 20/03/2018
- IVANCICH, H.; G. MARTINEZ PASTUR y P. PERI. 2011. *Modelos forzados y no forzados para el cálculo del índice de sitio en bosques de Nothofagus antártica en Patagonia Sur*. *Bosque* 32(2): 135-145.

- JARSUN, B.; J.A. GORGAS; E. ZAMORA; H. BOSNERO; E. LOVERA; A. RAVELO y J.L. TASSILE. 2006. *Recursos naturales de la provincia de Córdoba. Los suelos. Nivel de reconocimiento 1:500.000*. Agencia Córdoba ambiente S. E. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi. Córdoba.
- KAENNEL, M. Y F. H. SCHWEINGRUBER. 1995. *Multilingual glossary of Dendrochronology: Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian*. Instituto federal suizo de investigaciones forestales, nieve y paisajísticas. 467 pp., Birmensdorf.
- KER, M. F., Y C. BOWLING. 1991. *Polymorphic site index equations for four New Brunswick softwood species*. Can J. For. Res. 21: 728-732.
- LAPPI, J. Y R. L. BAILEY. 1988. *A height prediction model with random stand and tree parameters: an alternative to traditional site index methods*. For. Sci. 34(4): 907-927
- MADRIGAL, A. 1991. *Tablas de producción*. Seminario sobre inventario y ordenación de montes, Valsaín, Segovia. Vol. II, 32-70.
- MARTINEZ-PASTUR, G.; P. PERI; R. VUKASOVIC; S. VACCARO; V. PIRIZ-CARRILLO. 1997. *Site index equation for Nothofagus pumilio Patagonian forest*. **International Journal of experimental botany**. Foundation Romulo Raggio. 61 (1/2): 55-60, IX.
- MEYER, H.; A. RECKNAGEL; D. STEVENSON y R. BARTOO. 1961. *Forest Management*. Ronald Press, Nueva York. 282 p.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERIA Y PESCA DE LA NACION. Dirección de Producción Forestal. 2011. Sector forestal 2010. Buenos Aires, Argentina.
- MOGLIA, J.; A. M. GIMÉNEZ; D. GONZÁLEZ y R. GEREZ. 2010. *Caracterización de los anillos de crecimiento y su relación con la densidad básica de la madera en Eucalyptus camaldulensis*. Quebracho 18 (1,2): 47-57.
- NEWNHAM, R. M. 1988. *A modification of the Ek-Payandeh nonlinear regression model for site index curves*. Can J. For. Res. 18: 115-120.

- ORTEGA, A. y G. MONTERO. 1988. *Evaluación de la calidad de las estaciones forestales*. Revisión bibliográfica. *Ecología* 2, 155-184.
- PAYANDEH, B., Y Y. WANG. 1994. *Relative accuracy of a new baseage invariant site index model*. *For. Sci.* 40:341-343.
- PLEVICH J.; C. NUÑEZ; J.J. CANTERO; M. DEMAESTRI y S, VIALE. 2002. *Biomasa del pastizal bajo distintas densidades de pino elliotii*. *Agroforestería en las américas*. Vol. 9 N° 33-34
- QGis, D. T. 2011. Quantum GIS geographic information system. Open Source Geospatial Foundation Project, 45.
- QUIROS, D. 1998. *Ejecución del muestreo diagnostico en bosques naturales húmedos latifoliados*. Manejo forestal tropical no. 3. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 4p.
- REBOTTARO, S.L. y D.A. CABRELLI. 2007. *Crecimiento y rendimiento comercial de Pinus elliotii en plantación y en regeneración natural manejada con raleos en Entre Ríos, Argentina*. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Dasonomía
- RIVAROLA, A., R. SEILER, Y M. VINOCUR. 2015. *Datos climáticos de Las Guindas: serie de 15 años*. Servicio de Agrometeorología. FAV, UNRC
- RUEDEN, C.; C. DIETZ; M. HORN; J. SCHINDELIN; B NORTHAN; M BERTHOLD Y K. ELICEIRI. (2016). *ImageJ Ops* [Software]. En:
  - <http://imagej.net/Ops>. Consultado: 15/06/2017
- SECRETARIA DE AGRICULTURA GANADERIA Y PESCA. 1999. *Argentina: oportunidades de inversión en bosques cultivados*. Buenos Aires, Argentina. 208 p.
- STANSFIELD, W. F., J. P. MCTAGLE, Y R. LACAPA. 1991. *Dominant height and site index equations for ponderosa pine in east central Arizona*. *Can. J. For. Res.* 21: 606-611.

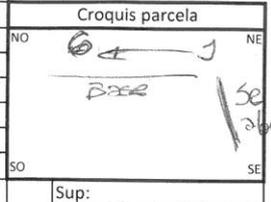
- TORRES ROJO, J. M. 2001. *Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal*. Centro de Investigación y Docencia Económicas. División de Economía. Toluca, México. *Agrociencia*. Volumen 35, número 1.
- TSCHINKEL, H. M. 1972. *Growth, site factors a nutritional status of Cupressus lusitanica plantations in the highlands of Colombia*. Tesis doctoral. Alemania. Universidad de Hamburgo. 165p.
- VALLA, J. J. 1979. *Botánica. Morfología de las plantas superiores* (No. 04, Volumen III.).
- VASQUEZ, W. y L. UGALDE. 1995. *Rendimiento y calidad de sitio para Gmelina arborea, Tectona grandis, Bombacopsis quinatum y Pinus caribaea*. Guanacaste, Costa Rica. CATIE.
- VITA ALONSO, A. 1978. *Los tratamientos silviculturales*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 234 p.
- WABO, E. 2002. *Tema 15: Calidad de sitio e Índice de sitio*. Curso de Biometría Forestal. Guía de clases. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. PP.1-5.
- ZUPAN, E. 2013. *Aproximación a la evaluación de los daños causados por los incendios que afectaron los macizos forestales del departamento Calamuchita*. Ministerio de agroindustria. Presidencia de la Nación. Subsecretaría de Desarrollo foresto- industrial. Córdoba forestal.

**Anexo 1**

**Planilla de relevamiento utilizada para tomar los datos de DAP, estado de los individuos, altura de los árboles dominantes, posición cardinal de la parcela y marco de plantación.**

Parcela:		Fecha: 26-08-2015		Lugar: Las Guindas. SSP Santiago					
N°	Eleg.	Circ. (cm)	DAP (cm)	Altura	h Inic. Cop.	Ancho Cop	E.San.	Terc. def.	
1		80,5	+38	+2,5					
2		F							
3		68							
4		68,5							
5		F							
6		F							
7		82,5	+37,5	+4					
8		87,5	+19,5	+4,5					
9		55							
10		64,5							
11		F							
12		F							
13		65,5							
14		87	+28	+2					
15		F							
16		68,5							
17		F							
18		F							
19		F							
20		67							
21		64							
22		F							
23		73							
24		80,5							
25		82							
26		77,5							
27		F							
28		80							
29		80							
30		90,5	+18,25	-0,25					
31		F							
32		73							
33		78,5							
34		M							
35		76	+15	+1,25					
36		77							
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									

20 P 1



Estado Sanitario	
1	Sano bien formado
2	Sano mal formado
3	Enfermo
4	Muerto
5	Cortado

Tercio del defecto	
1	Inferior
2	Medio
3	Superior

Media = 76

4



**Anexo 2**

Medición de diámetros de anillos en árboles de la misma edad en posición de valle (a), ladera baja (b) y ladera alta (c).

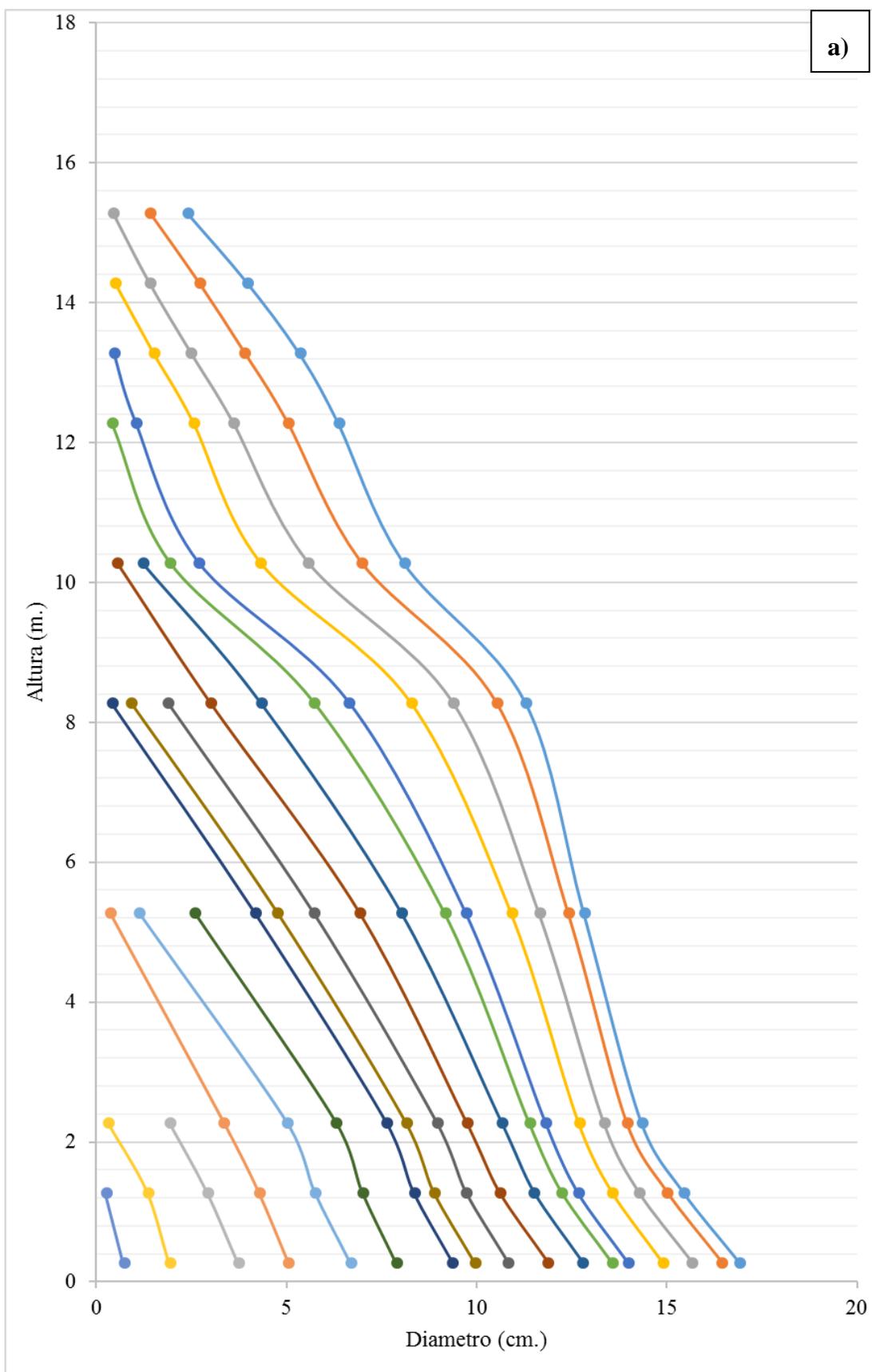
<b>a)</b>		<b>Diámetro (cm.)</b>									
		<b>0,3</b>	<b>1,3</b>	<b>2,3</b>	<b>5,3</b>	<b>8,3</b>	<b>10,3</b>	<b>12,3</b>	<b>13,3</b>	<b>14,3</b>	<b>15,3</b>
<b>Altura (m)</b>	<b>Edad (Años)</b>										
	<b>18</b>	16,86	15,40	14,31	12,80	11,26	8,06	6,34	5,31	3,95	2,37
	<b>17</b>	16,41	14,97	13,91	12,38	10,49	6,94	5,01	3,87	2,67	1,38
	<b>16</b>	15,63	14,23	13,31	11,61	9,35	5,54	3,58	2,46	1,38	0,42
	<b>15</b>	14,85	13,53	12,65	10,88	8,24	4,29	2,53	1,48	0,47	
	<b>14</b>	13,94	12,63	11,79	9,68	6,62	2,66	1,02	0,44		
	<b>13</b>	13,52	12,20	11,35	9,12	5,70	1,91	0,40			
	<b>12</b>	12,75	11,47	10,63	7,99	4,30	1,19				
	<b>11</b>	11,84	10,57	9,71	6,89	2,97	0,53				
	<b>10</b>	10,79	9,69	8,92	5,68	1,85					
	<b>9</b>	9,91	8,85	8,11	4,73	0,89					
	<b>8</b>	9,33	8,32	7,60	4,14	0,38					
	<b>7</b>	7,84	6,97	6,28	2,56						
	<b>6</b>	6,64	5,72	4,99	1,10						
	<b>5</b>	5,01	4,24	3,32	0,35						
	<b>4</b>	3,69	2,89	1,89							
	<b>3</b>	1,89	1,33	0,28							
	<b>2</b>	0,69	0,22								

<b>b)</b>		<b>Diámetro (cm.)</b>									
<b>Edad (años)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>0,3</b>	<b>1,3</b>	<b>2,3</b>	<b>5,3</b>	<b>8,3</b>	<b>10,3</b>	<b>11,3</b>	<b>12,3</b>	<b>13,3</b>	<b>14,3</b>
		<b>18</b>		13,72	13,49	13,00	12,86	9,95	7,98	6,53	4,20
<b>17</b>		13,17	12,96	12,45	12,14	9,04	6,93	5,49	3,37	2,25	1,84
<b>16</b>		12,68	12,52	12,02	11,60	8,20	6,08	4,67	2,76	1,51	1,29
<b>15</b>		12,05	11,98	11,48	10,94	7,48	5,23	3,89	2,15	0,92	0,74
<b>14</b>		11,41	11,31	10,79	10,00	6,28	3,98	2,82	1,32	0,45	0,24
<b>13</b>		11,10	11,02	10,44	9,51	5,53	3,36	2,29	0,99		
<b>12</b>		10,64	10,51	9,87	8,61	4,49	2,37	1,47	0,45		
<b>11</b>		9,97	9,94	9,13	7,50	3,35	1,36	0,74			
<b>10</b>		9,37	9,31	8,46	6,36	2,34	0,54	0,31			
<b>9</b>		8,55	8,55	7,56	4,97	1,30	0,19				
<b>8</b>		7,51	7,35	6,35	3,47	0,78					
<b>7</b>		6,13	5,98	4,92	1,88	0,30					
<b>6</b>		4,76	4,56	3,38	0,42						
<b>5</b>		3,87	3,50	2,16							
<b>4</b>		2,58	2,19	0,89							
<b>3</b>		1,44	1,04	0,28							
<b>2</b>		0,32	0,17								

<b>c)</b>		<b>Diámetro (cm.)</b>							
<b>Edad (años)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>0,3</b>	<b>1,3</b>	<b>2,3</b>	<b>5,3</b>	<b>7,3</b>	<b>9,3</b>	<b>10,3</b>	<b>11,3</b>
		18	15,82	13,47	12,45	11,68	9,96	6,37	5,09
17	15,07	12,87	11,81	10,98	9,04	5,41	4,11	2,14	
16	14,11	12,01	11,07	10,16	8,06	4,50	3,22	1,37	
15	13,11	11,34	10,46	9,47	7,25	3,92	2,60	0,98	
14	11,73	10,27	9,28	8,04	5,51	2,54	1,57	0,43	
13	11,14	9,81	8,86	7,29	4,42	1,61	0,42		
12	10,50	9,23	8,27	6,37	3,41	0,85			
11	9,84	8,72	7,73	5,51	2,39	0,41			
10	9,05	8,00	6,95	4,42	1,44				
9	8,10	7,06	5,95	3,21	0,68				
8	7,22	6,18	4,93	2,01	0,39				
7	6,35	5,37	4,06	1,12					
6	5,10	4,17	2,70	0,37					
5	4,04	3,31	1,77						
4	3,22	2,58	0,89						
3	2,13	1,35	0,27						
2	0,85	0,23							

**Anexo 3**

**Altura vs. Diámetro de árbol de la misma edad en posición de valle (a), ladera baja (b) y ladera alta (c)**







#### Anexo 4

**Altura vs. Edad de árboles de la misma edad en posición de Valle, Ladera baja y Ladera alta**

<b>Edad</b>	<b>Altura</b>		
	<b>Valle</b>	<b>Ladera baja</b>	<b>Ladera alta</b>
<b>2</b>	1,8	2	1,6
<b>3</b>	2,7	3,3	2,6
<b>4</b>	4,4	4,5	3
<b>5</b>	5,7	5,7	3,8
<b>6</b>	6,4	6,4	5,5
<b>7</b>	7,8	7,9	6,3
<b>8</b>	8,8	8,8	7,3
<b>9</b>	9,3	9,7	8,1
<b>10</b>	10,1	10,8	8,9
<b>11</b>	11	11,8	9,8
<b>12</b>	11,8	12,7	10,4
<b>13</b>	12,7	13,3	11
<b>14</b>	13,5	14,1	12
<b>15</b>	14,9	15,1	12,9
<b>16</b>	15,9	15,7	13,3
<b>17</b>	17,3	16,2	14
<b>18</b>	18,8	17	14,9