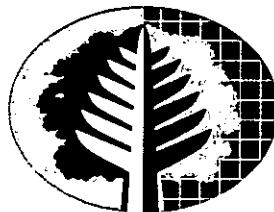


49



**INFOR**  
Instituto Forestal

95FO-11

**INVESTIGACION MANEJO SILVICOLA DE  
ESPECIES DEL GENERO EUCALYPTUS**

INFORME FINAL

CONCEPCION, enero 1998

+++0  
J. 049.  
1998.  
1-2

**INVESTIGACION MANEJO SILVICOLA DE  
ESPECIES DEL GENERO EUCALYPTUS**

INFORME FINAL

CONCEPCION, enero 1998

## INDICE

	Página
1. INTRODUCCION.....	1
2. OBJETIVOS .....	2
2.1 Objetivo General.....	2
2.2 Objetivos Específicos.....	2
3. METODOLOGIA.....	3
4. RESULTADOS .....	5
4.1 Objetivo : Mantener y medir los ensayos ya existentes, instalados por INFOR, que resulten de utilidad para los objetivos del proyecto.....	5
* Medición y raleo en el ensayo de E. Globulus en el predio Pantanillo (VII Región).....	5
* Incorporación al banco de datos de las mediciones y planificación de las evaluaciones anuales.....	11
4.2 Objetivo : Crear un banco de datos con la información de los ensayos y parcelas experimentales de INFOR y de las empresas.....	14
* Base de datos relacionada .....	14
4.3 Objetivo : Identificación de zonas de crecimiento para las principales especies del género cultivadas en Chile .....	17
4.4 Objetivo : Producir modelos simuladores de crecimiento y rendimiento bajo manejo, para las principales especies del género Eucalyptus cultivadas en el país especialmente para las zonas de mejor aptitud de cada especie.....	19
* Estudio para la determinación de funciones de volumen en rodales adultos originados a partir de monte alto de E. Globulus (relaciones funcionales).....	19
* Estudio para el diseño de ensayos de monte bajo y monte medio en E. Globulus .....	20

* Información adicional para el manejo forestal de eucalipto basada en ensayos de INFOR .....	21
* Cálculo y revisión de variables por hectárea en parcelas permanentes.....	22
* Índices de sitio y crecimiento en altura .....	24
* Estudio de la mortalidad natural .....	26
* Modelo compatible de rendimiento y crecimiento para Area Basal.....	28
* Modelos de crecimiento y rendimiento para Eucalyptus (modelo de predicción de volumen) .....	32
* Análisis de la información recogida desde los diferentes ensayos y de la bibliografía relacionada con el cultivo del eucalipto .....	37
* Diseño del modelo de simulación de eucalipto .....	37
* Contactos con las empresas.....	39
* Preparación proyecto FDI.....	41
* Asistencia a Conferencia IUFRO .....	41
4.5 Objetivo : Desarrollar un modelo para la utilización de fustes, basados en funciones de ahusamiento general y locales, para las especificaciones técnicas de los productos demandados por el mercado.....	42
* Estudio para la determinación de funciones de conicidad (ahusamiento) en rodales adultos de E. Globulus requeridas para su utilización en un futuro simulador de trozado para eucalipto.....	42
* Modelo optimizador en la utilización de fustes (trozador), programación y validación.....	50
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	60
6. CONCLUSIONES.....	65

7.	RESUMEN FINANCIERO .....	69
8.	ANEXOS .....	70

## PRÓLOGO

Este Informe de Avance presenta las actividades realizadas por la Gerencia de Investigación de INFOR, en el desarrollo del proyecto Manejo Silvícola de Especies del Género *Eucalyptus*.

El equipo de profesionales que participó en el proyecto estuvo compuesto por las siguientes personas:

Ingenieros forestales señores José Eugenio De La Maza, Mauro Ferrando T, Carlos Kahler González, Esteban Sandoval González y Cristián Pincheira Barrera.

Responsable del proyecto es el ingeniero forestal, señor Juan Carlos Pinilla Suárez.

La contraparte del estudio, en representación de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), estuvo a cargo del Ejecutivo de Proyectos FDI señor Hector Vera.

## RESUMEN EJECUTIVO

La gran superficie plantada, el rápido crecimiento demostrado, su adaptabilidad a diversas condiciones de suelo y clima, y sus propiedades madereras, han transformado a las especies del Género *Eucalyptus* en un recurso de importancia económica, tanto a nivel mundial, como nacional. El uso racional y eficiente de estos recursos hacen necesario y urgente la realización de investigación en relación con su adaptabilidad, capacidad de respuesta a diferentes esquemas de manejo forestal y tratamientos, que optimicen su crecimiento y, fundamentalmente, su rendimiento.

Dadas las superficies abarcadas por los eucaliptos en Chile, y las actuales tasa de consumo y forestación, se hace necesario para el país contar con algún tipo de instrumento que permita conocer, anticipadamente, los rendimientos volumétricos y tipo de productos que se pueden esperar de un rodal de eucalipto a una edad determinada.

Para realizar este tipo de investigación, se ha optado por el establecimiento y medición periódica de parcelas o ensayos experimentales en rodales de eucalipto, representando diversas situaciones de localización y manejo. La información recolectada desde este tipo de fuentes, es la base para cualquier estudio de manejo forestal y otros relacionados, intentando buscar la optimización de la producción en términos biológicos y económicos.

Por ello, INFOR, en su rol de fomento al desarrollo forestal del país, instaló ensayos de diferentes tipos utilizando eucaliptos, entre la V y X Región. El primer objetivo de estos ensayos fue el identificar la adaptabilidad de distintas procedencias y progenies de eucalipto, a las diversas condiciones ecológicas del país. El resultado de ello fue la selección de aquellas especies y procedencias más promisorias para cada área de interés forestal.

Paralelo a esta investigación, y en vista de los resultados obtenidos en crecimiento y rendimiento desde los primeros ensayos y otros antecedentes, se inició una nueva línea de estudio orientada a obtener de las plantaciones de eucalipto su máximo retorno económico. Este estudio debía abarcar el comportamiento, crecimiento y respuestas al manejo de las especies de eucalipto seleccionadas.

Esta nueva investigación implicó seleccionar algunos ensayos e instalar otros, su mantenimiento y la continuación de las mediciones.

El aumento de la base experimental incluyó nuevas especies en lugares donde este género aún no ha sido probado, centrando el estudio hacia el manejo silvícola de las especies cuya adaptabilidad, crecimiento y calidad fueron destacadas en los primeros resultados de la investigación de INFOR en relación con el eucalipto.

Entre los temas abordados por esta nueva línea de investigación se incluyó, además de las mediciones, la determinación de relaciones funcionales biométricas, funciones de rendimiento, modelos de conicidad, modelo de trozado, zonas de crecimiento y un manejador de la base de datos reunida por el proyecto.

La búsqueda de información se realiza especialmente en rodales jóvenes de eucalipto (menores a 10 años) y en rodales adultos de edades superiores a los 25-30 años. Esta situación se debe a que actualmente los rodales de eucalipto son cosechados a temprana edad para ser destinados a producción de pulpa. Mientras que por otro lado, existen pocos rodales adultos que por diversas razones no han sido cosechados, convirtiéndose en una atractiva fuente de información para el proyecto, dado que entregan antecedentes acerca de las asíntotas en crecimiento que presentan los rodales de eucalipto.

Existe, por lo tanto, una falta de antecedentes en los puntos que constituyen la porción intermedia de la curva de crecimiento de los rodales (entre los 10 a 25 años), la cual puede ser solucionada con la mantención y medición de parcelas permanentes por un período más largo que el de la cosecha actual.

La necesidad de contar con herramientas de simulación avanzadas para el manejo forestal, utilizando los actuales medios computacionales, requiere como primer paso la obtención de las relaciones, funciones o modelos que esta investigación desarrollará.

Actualmente se está trabajando en el diseño y validación de estos modelos y funciones, en la identificación de las necesidades de investigación de las empresas forestales en relación con el cultivo del eucalipto, en el ajuste de modelos de conicidad para rodales adultos, en el manejador de la base de datos relacionada y en desarrollo de un modelo trozador que utilizará el modelo de conicidad para rodales adultos.

El estudio se ha centrado en las principales especies de eucalipto utilizadas en el país. Estas corresponden a *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. delegatensis*, *E. regnans* y *E. camaldulensis*. De estas, *E. globulus* concentra el mayor porcentaje de investigación, seguida del *E. nitens*.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del marco del proyecto **Investigación Manejo Silvícola del Género *Eucalyptus***, la Gerencia de Investigación de INFOR ha continuado la investigación destinada a incorporar distintos tipos de manejo en el cultivo del ***Eucalyptus***.

El aspecto mas relevante en este sentido tiene relación con la obtención de información presente y futura desde los ensayos utilizados por el proyecto.

El análisis de la información recolectada permitirá conocer las características de crecimiento de algunas especies del género ***Eucalyptus*** que crecen en Chile. Este conocimiento permitirá predecir el desarrollo de los rodales y estimar las futuras producciones volumétricas a través del ajuste y utilización de modelos de tipo matemáticos.

El conjunto de modelos a desarrollar, referidos principalmente a variables básicas, será el punto de partida que permitirá contar en el corto plazo con una herramienta que, unido a otros conocimientos, definirán las combinaciones de manejo óptimo que permitan alcanzar los diversos objetivos de producción.

Estas herramientas serán un sistema de apoyo a la gestión y toma de decisiones de manejo para los productores de ***Eucalyptus*** del país.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Generales.

Definir un conjunto de regímenes de manejo para especies del género **Eucalyptus**, específicos por producto o combinación de productos a obtener, que se adapten y varíen de acuerdo con las condiciones de sitio (clima y suelo) y que sean eficientes desde el punto de vista económico.

La gama de regímenes deberá ser suficientemente amplia que permita la simulación de alternativas de oferta. Lo anterior debe cubrir las principales especies, en sus respectivas zonas de crecimiento.

### 2.2 Objetivos Específicos.

- a) Mantener y medir los ensayos ya existentes, instalados por INFOR, que resulten de utilidad para los objetivos del proyecto.
- b) Crear un Banco de Datos con la información de los ensayos y parcelas experimentales de INFOR y de las empresas.
- c) Identificar zonas de crecimiento para las principales especies del Género cultivadas en Chile.
- d) Producir modelos simuladores de crecimiento y rendimiento bajo manejo, para las principales especies del Género **Eucalyptus** cultivadas en el país, especialmente para las zonas de mejor aptitud de cada especie.
- e) Desarrollar un modelo optimizador en la utilización de fustes, basado en funciones de ahusamiento generales y locales, para las especificaciones técnicas de los productos demandados por el mercado.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología general del proyecto se basó en la instalación y medición de parcelas permanentes de eucalipto, las que correspondieron a unidades experimentales desde las cuales anualmente se obtuvo información.

Con la información reunida se conformó una base de datos relacional multipropósito, junto con el desarrollo de un programa administrador de datos.

Del análisis y depuración de la información se obtuvieron antecedentes que permitieron trabajar en el ajuste de modelos de crecimiento y rendimiento del eucalipto.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos se intentó definir zonas geográficas potenciales de igual crecimiento, un modelo trozador y un conjunto de relaciones funcionales que permitieron el desarrollo de una primera versión de un modelo simulador del crecimiento para eucalipto.

La metodología específica según objetivo fue la siguiente:

**Objetivo a)** : *Mantener y medir los ensayos ya existentes, instalados por INFOR, que resulten de utilidad para los objetivos del proyecto.*

Se realizó un programa anual de intervención, medición y mantención de unidades experimentales instaladas por el proyecto y otras instaladas con anterioridad. Se establecieron acuerdos con los propietarios de los predios (empresas o particulares) para garantizar la protección de los ensayos. ✓

**Objetivo b)** : *Crear un Banco de Datos con la información de los ensayos y parcelas experimentales de INFOR y de las empresas.*

La metodología utilizada se centró en generar un programa administrador de datos y la base misma en un formato adecuado. La base se constituyó por la integración de información proveniente de ensayos antiguos de INFOR, datos de las empresas y las nuevas unidades experimentales que el proyecto instaló. ✓

**Objetivo c) :** *Identificar zonas de crecimiento para las principales especies del Género cultivadas en Chile.*

A través de la superposición de la zonificación edafo-climática existente (INFOR - Universidad de Chile, 1979) con los Índices de Sitio (altura promedio dominante a la edad de 10 años) obtenidos desde las distintas unidades experimentales utilizadas por el proyecto, se generaron zonas de isocrecimiento para **Eucalyptus**.

**Objetivo d) :** *Producir modelos simuladores de crecimiento y rendimiento bajo manejo, para las principales especies del Género **Eucalyptus** cultivadas en el país, especialmente para las zonas de mejor aptitud de cada especie.*

Sobre la base de los datos de las unidades experimentales instaladas y medidas en forma anual, se formuló una primera versión de un modelo simulador del crecimiento de las principales especies del género **Eucalyptus**.

Este modelo se basa en el ajuste y validación de una serie de relaciones funcionales que permiten modelar el comportamiento de los rodales de eucalipto. Los análisis se realizaron utilizando técnicas estadísticas y matemáticas.

**Objetivo e) :** *Desarrollar un modelo optimizador en la utilización de fustes, basado en funciones de ahusamiento generales y locales, para las especificaciones técnicas de los productos demandados por el mercado.*

A través del desarrollo de un modelo trozador se genera una herramienta capaz de entregar el resultado de cualquier programa de trozado que se implemente, ya sea a nivel de árbol o rodal.

El programa se desarrolla como una Macro del programa Excel, con el fin de ser utilizado por cualquier usuario de computador. El lenguaje utilizado corresponde a Basic, el cual permite integrar una serie de subrutinas que conforman el programa final.

Una vez conseguido el modelo se debe iterar para lograr el óptimo de una programa objetivo que se defina, el que probablemente sea el valor económico total de cada árbol o rodal.

## 4. RESULTADOS

Las actividades del proyecto desarrolladas durante los años 1995, 1996 y 1997 corresponden a:

**4.1. Objetivo : *Mantener y medir los ensayos ya existentes, instalados por INFOR, que resulten de utilidad para los objetivos del proyecto.***

***Actividad 1: Medición y raleo en el ensayo con E. globulus en el predio Pantanillo (VII Región).***

El ensayo ubicado en el predio Pantanillo (Constitución, VII Región), perteneciente a la Universidad de Chile, es parte importante del proyecto ya que en él se ensayan distintos tipos de espaciamientos, podas y raleos aplicados en *E. globulus*, además, de ubicarse en un área de alto interés forestal, tanto a nivel de empresas como de propietarios particulares.

El objetivo específico del ensayo es probar distintos esquemas de espaciamiento, poda y raleo en una plantación de *E. globulus ssp globulus* de acuerdo a un esquema predeterminado basado en el número de árboles, decidido con anterioridad, que llegará a la edad de cosecha final.

Los resultados del ensayo han sido evaluados, y seguirán siéndolo hasta incluso luego de la cosecha final, a través de las respuestas obtenidas en las variables más representativas del rodal y de los productos a obtener, intentando definir y obtener las relaciones funcionales que entre ellas existen. Los tratamientos utilizados en el ensayo se presentan en el Cuadro N°1.

La información derivada del análisis de los primeros resultados obtenidos en este ensayo originaron un artículo técnico, el cual fue publicado en el número de diciembre de 1995 de la revista Ciencia e Investigación Forestal que edita INFOR. Una copia del documento se presenta en el Anexo N°1.

Para cumplir con los objetivos del proyecto es necesario que se realicen las actividades de terreno contempladas para cada año. Estas correspondieron a la medición de las parcelas del ensayo, la marcación del raleo y ejecución del mismo, y la medición de los fustes volteados producto del raleo. Con esta última información se intentará la construcción de funciones de ahusamiento y volumen aplicable a esta especie en las condiciones donde se ubica.

Esta actividad se realizó en 1995 y 1996, finalizando durante la segunda quincena de julio de 1997.

**Cuadro N°1. Ensayo de regímenes de manejo para *Eucalyptus globulus* en el predio Pantanillo (VII Región).**

OBJETIVO PRODUCCIÓN	PARCELA N°	DENSIDAD INICIAL	ALTURA MEDIA (m)				
			10,5	10,5	13,5	13,5	40
			NUMERO ÁRBOLES/ha				
			DR	PD1	DR	PD2	EXPL
PULPA/ASTI	1	2.500(*)	---	---	---	---	2500
PULPA/ESTR	2	2.500	1500	---	400	---	400
PULPA/ASER	3	2.500	1000	600	300	300	300
PULPA/ASER	4	1.667	1000	600	300	300	300
EXPO/TROZA	5	1.250(*)	---	---	---	---	1250
ASER/SNUDO	6	1.250	800	500	300	300	300
ASER/SNUDO	7	1.250	400	400	200	200	200
CHAP/SNUDO	8	833	500	500	300	300	300
PULPA/ASTI	9	625(*)	---	---	---	---	625
ASER/SNUDO	10	625	300	300	200	200	200
CHAP/SNUDO	11	625	300	300	300	100	100

NOTA : DR : Número de árboles después del raleo.  
 PD1 : Número de árboles con altura de poda a los 3 a 4 m.  
 PD2 : Número de árboles con altura de poda hasta 7,5 m.  
 (\*) : Densidad inicial menos la mortalidad.

Se ha evaluado la información proveniente de la última medición (1997), en la cual son analizados los parámetros altura (m), diámetro a la altura del pecho (DAP) (cm) y área basal (m<sup>2</sup>/ha) según tratamiento. Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico preliminar, los que se exhiben en el Cuadro N°2. Al mismo tiempo, en los Gráficos N°1; 2; 3; 4; 5 y 6, se presentan los DAP, altura y área basal, según cada año de evaluación y por tratamientos utilizados.

De los resultados se puede concluir que :

- En 1997 los menores crecimientos en altura media se observan en los tratamientos de mayor espaciamiento (4x4 m y 4x3 m), no siendo significativamente diferentes a los que se presentan en el resto de los tratamientos. Por el contrario, los mayores incrementos en altura lo presentan los tratamientos con espaciamientos de 3x2 y 4x2 m los que, sin embargo, tampoco presentan diferencias estadísticamente significativas en relación al resto de los tratamientos.

Cuadro N°2. Resultados del ensayo de espaciamiento y raleo en Pantanillo.

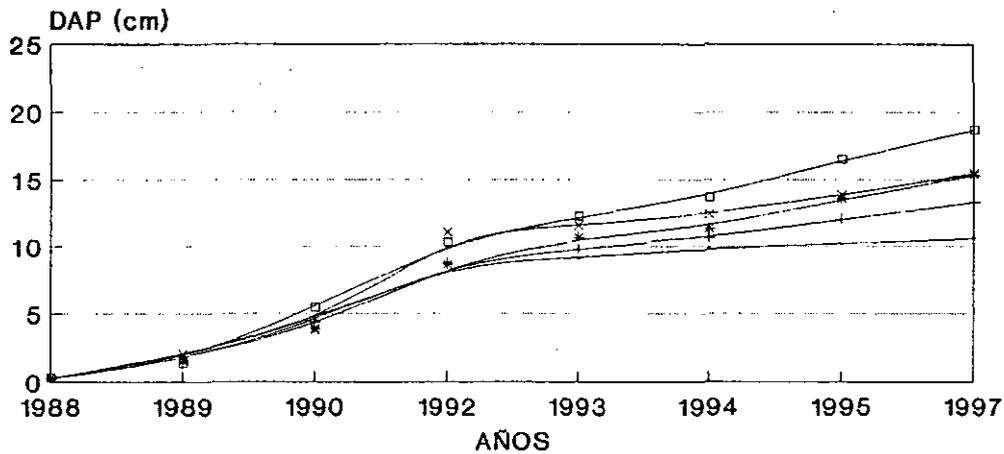
TRATAMIENTOS	EVALUACIÓN 1997		
	ALTURA (m)	DAP (cm)	ÁREA BASAL (m <sup>2</sup> /ha)
1	18,34	10,5 d	21,88 a
2	20,14	13,25 cd	5,55 cd
3	19,22	15,30 cd	5,53 cd
4	24,56	18,65 bc	8,21 bc
5	18,89	15,4 cd	23,28 a
6	20,64	18,6 bc	8,29 bc
7	24,03	24,35 ab	9,31 bc
8	21,12	17,25 c	7,02 bc
9	18,45	19,10 bc	18,00 ab
10	24,30	25,55 a	10,28 bc
11	24,58	26,65 a	16,83 abc
<b>SIGNIFICANCIA</b>	n.s.	***	***

Nota: Letras iguales señalan que no existen diferencias significativas, al nivel de significancia utilizado (\*\*\*) = 0,001%; n.s. = no significativo).

- El tratamiento con la mayor densidad, (2x2 m), es el que presentan los menores incrementos en DAP en la evaluación de 1997 (10,5 cm), y es estadísticamente diferente a los tratamientos con una menor densidad. El mayor incremento diametral lo presentan los tratamientos con una densidad final de 300 a 200 árb/ha (4x2, y 4x4 metros, respectivamente) los que no presentan diferencias significativas entre ellos.
- En la medición de 1997 se aprecia que no existen diferencias significativas en la altura media de los árboles, por lo que las distintas densidades no están afectando el desarrollo de esta variable, correspondiendo los valores observados a las condiciones de sitio existente.
- En esta misma medición, el DAP presentó diferencias altamente significativas entre los distintos tratamientos. El menor valor se presentó en el tratamiento 1 (2500 arb/ha densidad inicial sin raleo), mientras que el mayor valor estuvo en el tratamiento 11 (625 arb/ha densidad inicial y 300 arb/ha densidad final). En el resto de los tratamientos se presentaron valores intermedios, presentando diferencias estadísticas entre los distintos valores. En general, se confirma que a una menor densidad inicial se obtienen mayores DAP (Gráfico N°7).

Una copia del documento presentado a la Escuela de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, propietaria del predio se presenta en el Anexo N°2, junto con fotos del ensayo.

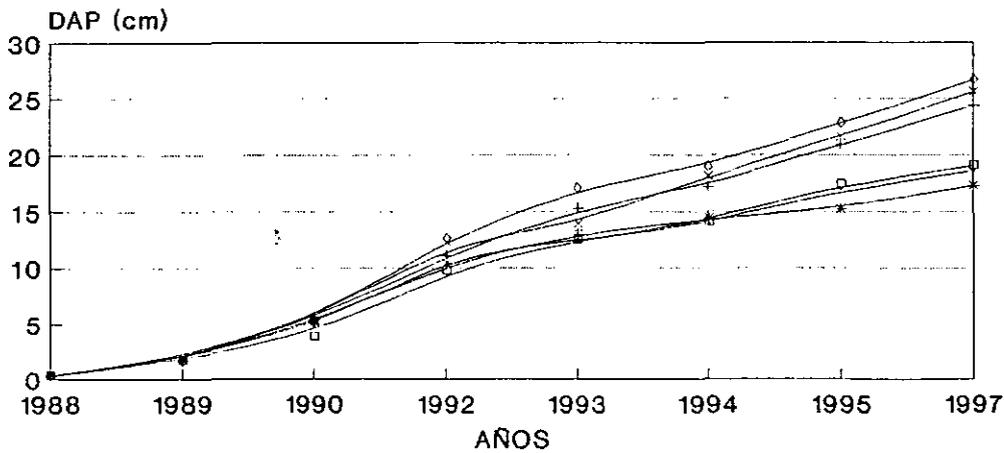
**GRAFICO N°1**  
**DAP MEDIO TRATAMIENTOS 1 A 5**  
*Eucalyptus globulus*



— TRATAMIENTO 1      —+— TRATAMIENTO 2      —\*— TRATAMIENTO 3  
 —□— TRATAMIENTO 4      —x— TRATAMIENTO 5

Pantanillo (VII Región)

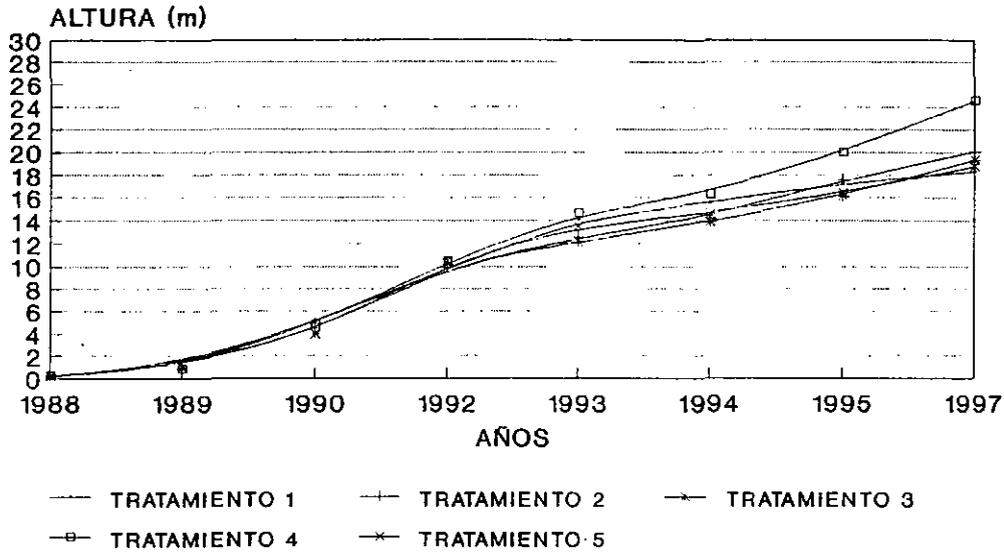
**GRAFICO N°2**  
**DAP MEDIO TRATAMIENTOS 6 A 11**  
*Eucalyptus globulus*



—+— TRATAMIENTO 6      —+— TRATAMIENTO 7      —\*— TRATAMIENTO 8  
 —□— TRATAMIENTO 9      —x— TRATAMIENTO 10      —◇— TRATAMIENTO 11

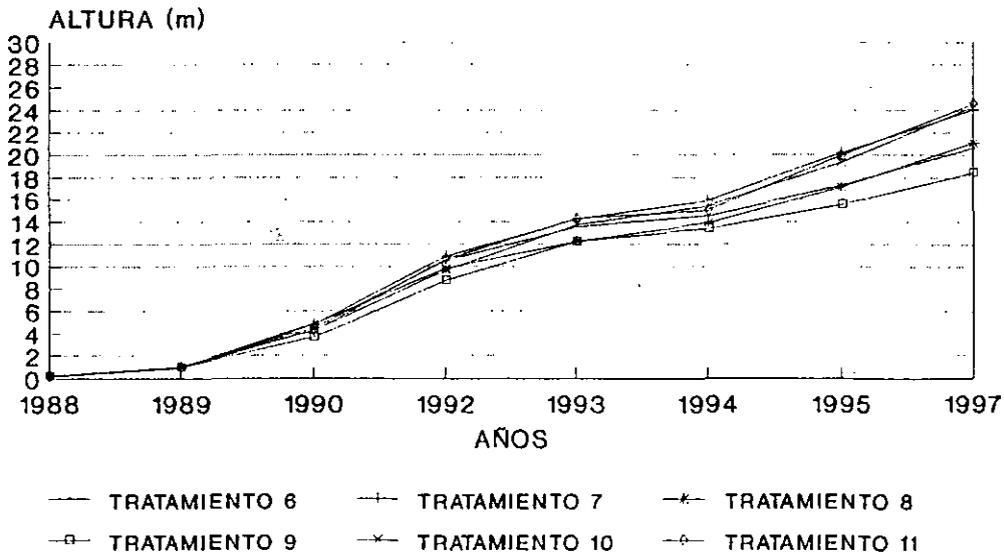
Pantanillo (VII Región)

### GRAFICO N°3 ALTURA TRATAMIENTOS 1 A 5 Eucalyptus globulus



Pantanillo (VII Región)

### GRAFICO N°4 ALTURA TRATAMIENTOS 6 A 11 Eucalyptus globulus

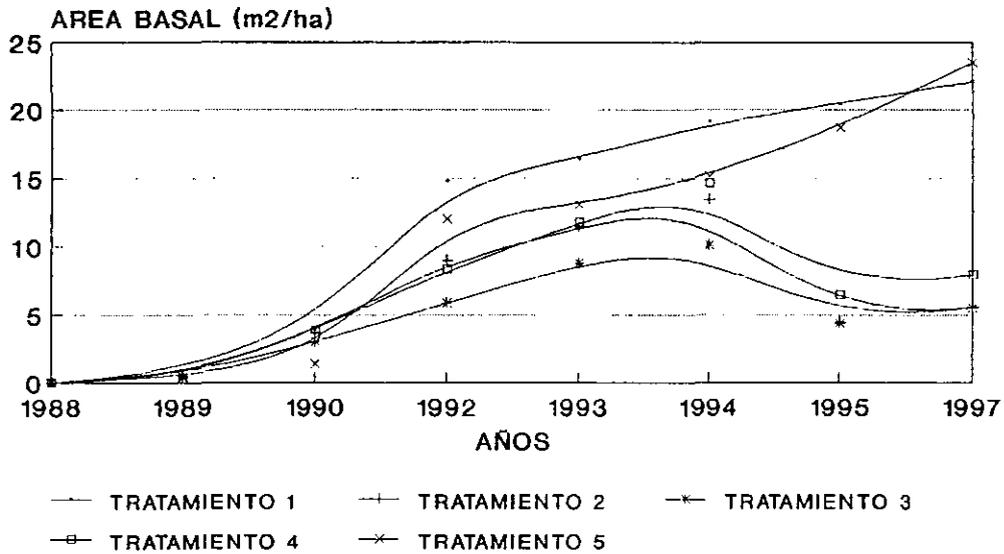


Pantanillo (VII Región)

## GRAFICO N°5

### AREA BASAL TRATAMIENTOS 1 A 5

Eucalyptus globulus

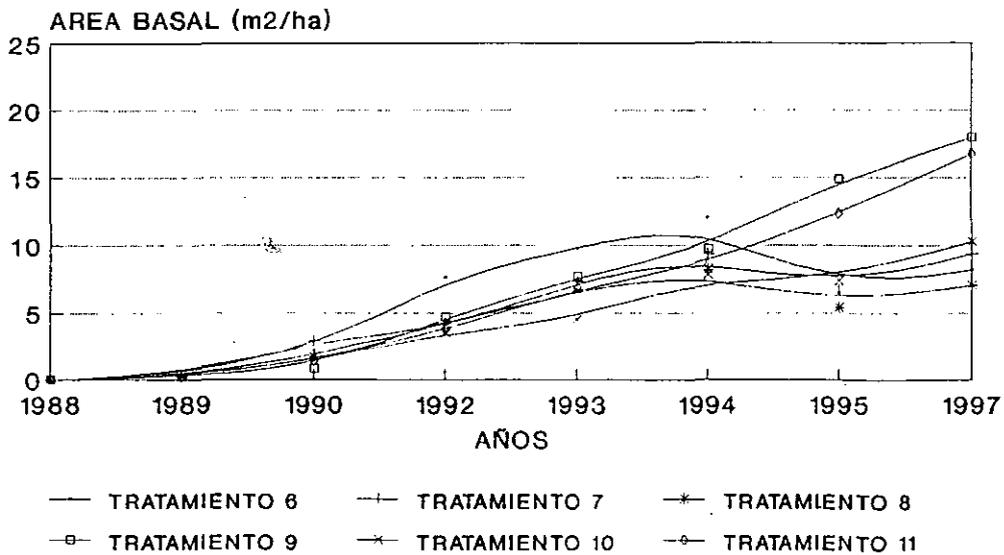


Pantanillo (VII Región)

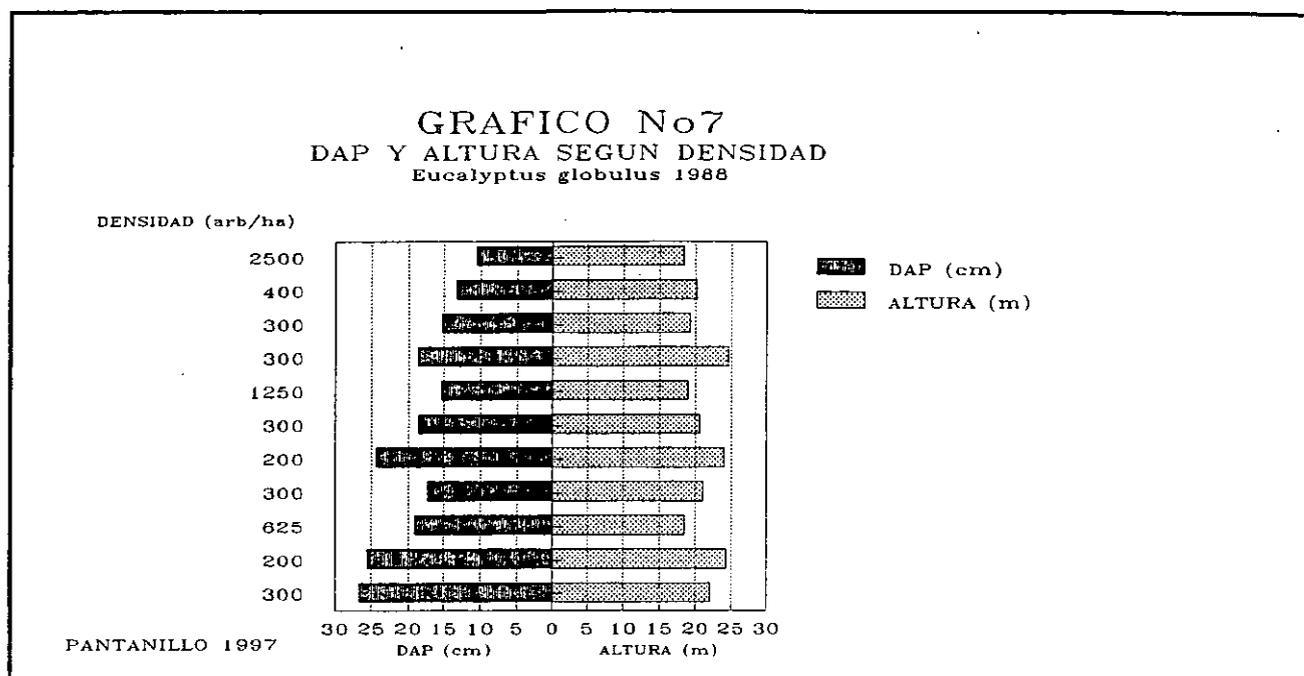
## GRAFICO N°6

### AREA BASAL TRATAMIENTOS 6 A 11

Eucalyptus globulus



Pantanillo (VII Región)



**Actividad 2: Incorporación al banco de datos de las mediciones y planificación de las evaluaciones anuales.**

El objetivo final de esta actividad es el mantener y medir los ensayos del proyecto, con el objetivo de generar la información necesaria para estudios de manejo y otros proyectos relacionados,

Durante el período que cubre este proyecto se adicionaron al banco de datos, mediciones y remediciones de parcelas permanentes luego de un proceso de digitación y revisión.

La información base utilizada proviene principalmente de la red de parcelas permanentes instaladas por INFOR y las empresas participantes en el proyecto. Estas parcelas están distribuidas homogéneamente en las plantaciones de Eucalipto, existentes entre la V y X regiones del país (Cuadro N°3).

En términos de distribución de edades, y como se muestra en el Gráfico N°8, prácticamente toda la información se concentra entre los 3 y 11 años de edad. Esto lógicamente limita el rango de validez de los modelos que se obtengan.

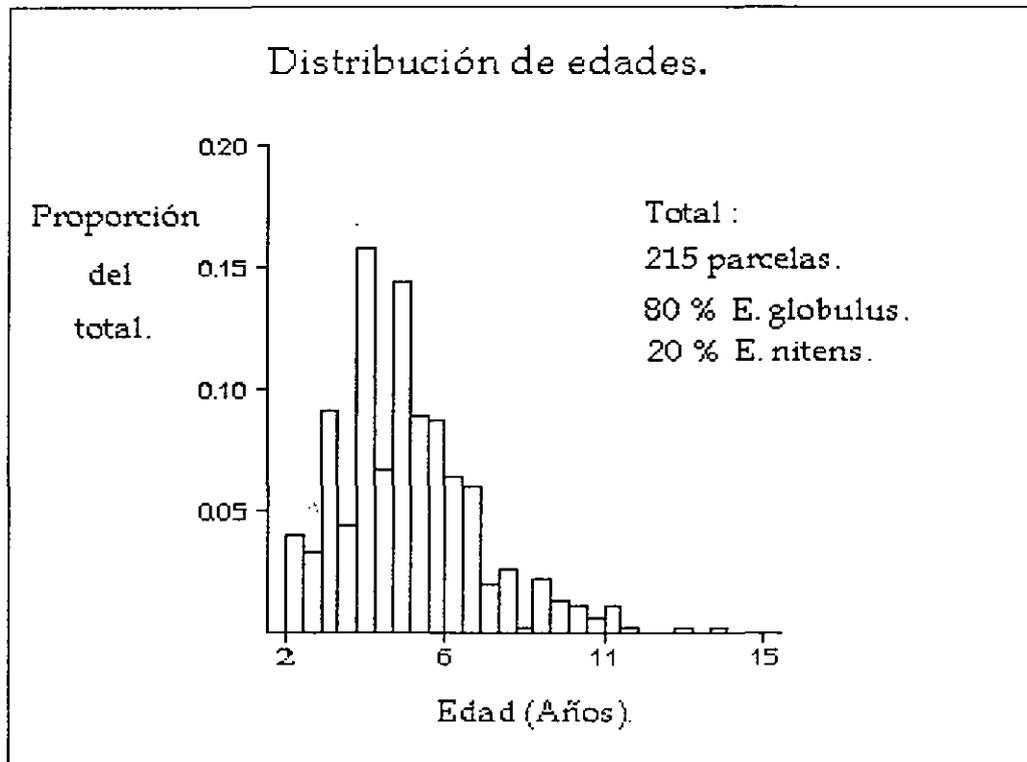
Como queda en evidencia más adelante algunas limitaciones de la información disponible, hacen importante la necesidad de continuar con la remediación de las parcelas. Esto además será útil en la evaluación y potencial desarrollo posterior del modelo de simulación a desarrollar. Sin olvidar la importancia que tiene el hecho de mantener activa y actualizada la actual red de parcelas permanentes, en la cual han sido invertidos tantos recursos y tiempo.

**Cuadro N°3. Parcelas permanentes del proyecto. Distribución (%) por regiones.**

Región	V	VI	VII	VIII	IX	X	Total
Parcelas (%)	6.9	7.4	12.3	36.5	17.2	19.7	100

Todas estas parcelas tienen a la fecha tres mediciones (años 1995, 1996 y 1997). Así del total de mediciones el 41.1% corresponde a primera medición (instalación), 39.2% segunda medición y 19.7% a la tercera.

Se efectuó una depuración de las series de mediciones (Gráfico N°9) que mostraron anomalías o inconsistencias claras, especialmente en altura (tendencias altura-edad y las relaciones altura-diámetro).



**Gráfico N°8. Distribución de edades en parcelas permanentes.**

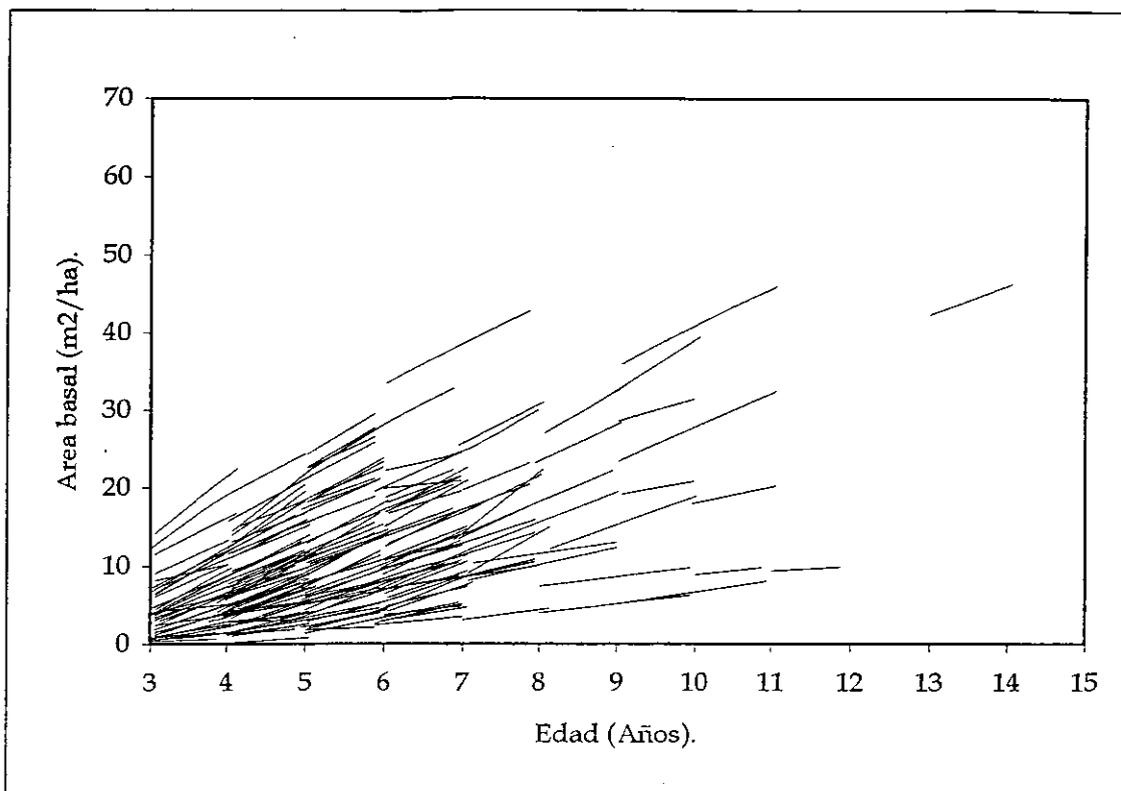


Gráfico N°9 . Series de mediciones de las parcelas permanentes (área basal).

El número total de parcelas permanentes utilizadas en el análisis asciende a 215 con un total de 523 mediciones. Cerca del 60% de estas parcelas han sido instaladas por las empresas participantes en el proyecto, en tanto que el 40 % restante por INFOR en las zonas no cubiertas por las compañías. La superficie de cada parcela es de 500 m<sup>2</sup> o 1000 m<sup>2</sup>. Se utilizó además como información complementaria y de apoyo, parcelas del programa de introducción de especies del Instituto Forestal - INTROESP y ensayos antiguos de eucalipto instalados por INFOR.

Para efectos de estimación de parámetros se descartaron las mediciones con edades superiores a 15 años, debido a la escasa participación y aporte que estas tienen en el total de datos, presentándose solo como puntos aislados.

Con respecto a variedad de especies, cerca del 80 % de los datos corresponden a *E. globulus*, y casi la totalidad del resto es *Eucalyptus nitens*.

Complementando la información expuesta arriba, y desde el punto de vista de rango de densidad, casi todas las parcelas permanentes se concentran entre los 600 y 2600 árboles por hectárea.

Otro punto importante en la descripción de los datos, es la ausencia de parcelas con intervenciones silvícolas (raleos o podas), lo que evidentemente limita el desarrollo de opciones que involucren manejo.

A esta base de datos se le debe agregar la información de parcelas permanentes que empresas participantes del proyecto han aportado.

Este conjunto de parcelas constituyen la base experimental del proyecto, la cual esta constantemente siendo revisada y validada.

Durante la temporada de terreno de 1995, 1996 y 1997, (julio a Septiembre), se recolectó la información de ensayos y parcelas permanentes establecidas por INFOR entre la V y X región y de otro conjunto de parcelas pertenecientes a empresas forestales.

El detalle de propietarios y ubicación (coordenadas y a nivel regional) de las parcelas permanentes instaladas por INFOR se presentan en el Anexo N°3, junto a la metodología de instalación de las parcelas permanentes y fotos de éstas.

La información recogida anualmente desde las parcelas permanentes fue procesada y enviada a los propietarios de los rodales para su conocimiento y como una forma de establecer una comunicación constante con ellos. Un modelo de esta información se presenta también en el Anexo N°3.

#### ***4.2 Objetivo Crear un Banco de Datos con la información de los ensayos y parcelas experimentales de INFOR y de las empresas.***

El objetivo final es la creación de un Banco de Datos con la información de los ensayos y parcelas experimentales de INFOR y de empresas participantes del proyecto. Generar un programa administrador, para validar y examinar datos y facilitar el uso de la información, tanto para este proyecto, como para otros en desarrollo por la Gerencia de Investigación de INFOR.

##### ***Actividad 1: Base de datos relacionada***

Una base de datos relacionada que permita el manejo, acceso y selección de la información de los ensayos o parcelas bajo distintos criterios, es una de las metas del proyecto. Por ello, continuamente se ha trabajado en su diseño y mejoramiento a través de distintas etapas. El administrador así desarrollado se denominó *EUCABAK*.

Durante los últimos meses los principales cambios se han reflejado en la parte del software o programa de la Base de Datos, debido a que el modelo ya ha sido implementado. Respecto de este último punto es bueno recalcar que, si bien la Base de Datos es actualmente operativa, es factible su modificación para un mejoramiento de la estructura relacional según se generen nuevos requerimientos.

Esta base de datos desarrollada consta de una estructura compuesta por 14 tablas, o archivos, donde se almacena la información total del proyecto. La mayor parte de éstas tablas se encuentran relacionadas entre sí por claves comunes, que en términos físicos corresponden a archivos de índice. Esta estructura de archivos es la básica para el desarrollo final del Administrador. Sin embargo, es posible modificarla especialmente agregando tablas, con el fin de mejorar aún más su eficiencia.

La base de datos al ser instalada queda automáticamente en un Grupo de Trabajo bajo ambiente Windows, en donde se incluyen los Iconos de cada uno de sus componentes. Estos componentes corresponden a Ayuda, Programa Administrador, Cambios más recientes de la última versión editada, Graficador (desarrollado en Visual Basic y totalmente independiente del Programa Administrador), y Parámetros del Gráfico.

El programa cuenta además, con la opción de impresión de resultados seleccionados y un menú de Configuración que permitirá adecuar el entorno a lo que el usuario desea y otro para la visualización de los códigos usados en las Bases de Datos. Como un punto de apoyo al usuario, se incorporó una pantalla de descripción breve inicial optativa, que permite al usuario un primer acercamiento al uso del programa.

Adicionalmente se ha independizado de la Base de Datos. Esto significa que la redistribución del Banco de Información puede ser actualizado en forma totalmente autónoma del Administrador.

El programa ejecutable cuenta con 6 discos de instalación, mientras que la Base de Datos tiene 3 discos. Cada conjunto de discos se instala independientemente. La instalación debe realizarse desde discos de 3,5" y 1,44 Mb. Además permite un funcionamiento en ambientes; Windows 3.11, Windows NT y Windows 95 (a elección). Los requerimientos mínimos son; un PC 80486, 8 MRam, 30 MB de HHDD libres, pantalla VGA o superior.

Bajo ambiente Windows esta base de Datos se diseñó con una serie de elementos, tales como:

- **Graficador:**

Corresponde a un programa desarrollado en Microsoft Visual Basic®. Permite la representación de los diferentes niveles de información, con 4 estilos de gráfico diferentes.

- ***Ayudas:***

Ayuda gráfica que permita la comprensión del diseño del programa, su Base de Datos, la instalación y funciones.

- ***Exportación de datos:***

Debido a que se trabaja con un formato de datos especial, exclusivo del Administrador, se ha incorporado una opción de exportar las tablas a formatos de uso corriente, tales como; ASCII (TXT), EXCEL 5.0 (XLS) ó Dbase (DBF). Esto le da una mayor potencialidad al programa porque permite la posibilidad de análisis particular. Con esta opción se puede exportar según algún filtro o el total de los datos del proyecto

- ***Impresión:***

Permite la impresión de una selección particular del usuario. Funcionará sólo si se está visualizando la información, de lo contrario permanecerá inactiva.

Los detalles del Administrador de Bases de datos, *EUCABAK*, se presentan en el Anexo N°4.

### **4.3 Objetivo Identificación de zonas de crecimiento para las principales especies del género cultivada en Chile.**

Para la definición de las zonas potenciales de crecimiento, se deben identificar los principales requerimientos de cada una de las especies, su tasa de crecimiento así como las características edáficas y climáticas de la zona de estudio. Los antecedentes básicos que se utilizan son los proporcionados por los ensayos instalados por el proyecto, los que se complementaron con datos recopilados bibliográficamente.

Para determinar las zonas de isocrecimiento de las especies de *Eucalyptus*, desde un punto de vista edáfico y climático, es necesario conocer dos tipos de características: las de la zona en estudio y las de la especie.

Para la obtención de las características del área de estudio se consultó literatura de suelos, zonificaciones climáticas, antecedentes topográficos y cartografía que varía en origen y en escala. En la recopilación de los antecedentes climáticos se utilizaron diversas de información, mientras que los datos de crecimiento se obtuvieron de las parcelas permanentes instalados por INFOR y desde otros ensayos del proyecto.

La revisión bibliográfica realizada demostró que en Chile se han realizado algunos estudios a nivel local en relación con la productividad potencial de los terrenos forestales donde se cultiva el eucalipto, tanto para monte alto como para rodales originados de monte bajo (rebrote). Sin embargo, esta información fundamental para la planificación y manejo forestal es muy limitada.

Es necesario entonces, producir un primer acercamiento a la definición de zonas de isoproductividad, utilizando al máximo la información existente y los medios disponibles, la que deberá revisarse a medida que se obtenga nuevas mediciones o información de crecimiento.

Para ello se ha definido a los 10 años como la edad base del estudio para eucalipto, (Índice de Sitio) por lo que a esa edad se proyectará toda la información de crecimiento y rendimiento reunida, por región y por especie, con el objetivo de determinar, en combinación con las características edafoclimáticas de cada zona, las zonas de igual crecimiento para eucalipto.

En la fase final del estudio se realizaron todas las correcciones de crecimiento derivadas de la temporada de mediciones del año 1997, cuya información, más la recopilada durante 1995 y 1996, permitió el reajuste de los modelos utilizados y la nueva proyección a los 10 años requerida en relación con los volúmenes producidos por las plantaciones de eucalipto. Luego de este trabajo se relacionó las zonas edafoclimáticas y el crecimiento proyectado.

Para la realización del estudio se contó con los ensayos instalados por el Instituto Forestal y empresas privadas para las especies *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* entre la V y X regiones del país (32° L.S. hasta 42° L.S. aproximadamente). En ellos se calculó el índice de sitio (altura dominante a los 10 años de los 100 árboles más altos por hectárea), agrupándose en seis clases de menor a mayor valor. Para cada clase se identificaron las condiciones de suelo y clima presentes a escala 1:250.000 y 1:500.000 respectivamente, con esta información y la asistencia de un sistema de información geográfica (SIG), se modelaron las zonas que en cada región presentan el mismo crecimiento potencial (clase de índice de sitio).

Con la información reunida y las áreas geográficas representadas por las unidades experimentales se obtuvo que para la especie *Eucalyptus globulus* se determinó para la clase 1 de índice de sitio (0 a menos de 16 m.) un total de 384.422 ha. en toda el área estudiada; para la clase 2 (16 m. a menos de 20 m.) un total de 2.959.947 ha.; para la clase 3 (20 m. a menos de 24 m.) un total de 1.303.603 ha.; para la clase 4 (24 m. a menos de 28 m.) 923.963 ha; para la clase 5 (28 m. a menos de 32 m.) 323.621 ha; y para la clase 6 (32 m. y más) 122.005 ha. En la especie *Eucalyptus nitens*, no se encontraron zonas en la clase 1 en toda el área estudiada; para la clase 2 se determinaron un total de 194.012 ha.; para la clase 3 un monto de 188.958 ha.; para la clase 4 un conjunto de 453.121 ha; para la clase 5 un total de 64.370 ha; y para la clase 6 un monto de 306.511 ha.

Además se encontraron dos o más ensayos de la misma especie con una clase de índice de sitio diferente en condiciones edafoclimáticas bibliográficas iguales, esto se puede atribuir a variables que no fueron controladas, como las condiciones genéticas del material utilizado, el manejo silvicultural aplicado a los ensayos, especialmente fertilización, y las condiciones de micrositio. Estas mismas condiciones pueden ser las causantes de que se registraran valores de índice de sitio diferentes en condiciones edafoclimáticas iguales en ensayos instalados por empresas privadas versus los de INFOR en la especie *Eucalyptus globulus*.

El trabajo final entrega las áreas regionales para cada clase de índice de sitio por especie y pertenencia de los ensayos y mapas escala 1:500.000 de las zonas de isocrecimiento potenciales.

Durante el estudio se intentó sintetizar el trabajo realizado para identificar las zonas de isocrecimiento potencial para *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* entre la V y X regiones del país.

Se identificó el tipo de clima y suelo presentes en los lugares en que el proyecto trabajó con los ensayos de las especies mencionadas y una vez caracterizado el sitio se procedió al análisis con la asistencia de un Sistema de Información Geográfica y de Bases de Datos Relacionales, donde se estudian los factores, con el objeto de identificar las zonas en que las condiciones son similares.

Para la obtención de las características del área de estudio se recurrió a información con escalas variables, aunque predominó 1:250.000. La representación gráfica de los resultados fue a escala 1:500.000.

En la Figura N°1 se presenta un ejemplo de los resultados según región para las zonas de isocrecimiento de *E. globulus* y *E. nitens*, mientras que una copia del documento final se presenta en el Anexo N°5.

**4.4 Objetivo. Producir modelos simuladores de crecimiento y rendimiento bajo manejo, para las principales especies del Género *Eucalyptus* cultivadas en el país, especialmente para las zonas de mejor aptitud de cada especie.**

El objetivo es generar un sistema de apoyo a la gestión y toma de decisiones de manejo, basado en un conjunto de funciones o modelos de crecimiento, rendimiento y funciones biométricas complementarias, para las principales especies del Género *Eucalyptus* cultivadas en el país y para zonas geográficas donde su cultivo se concentra, a través del uso de un simulador de crecimiento.

**Actividad 1: Estudio para la determinación de funciones de volumen en rodales adultos originados a partir de monte alto de *Eucalyptus globulus* (relaciones funcionales)**

Dentro de las actividades del proyecto se desarrollaron diferentes funciones de volumen para *E. globulus* adulto, dada la escasez de información en este sentido. Los datos para la construcción de estas funciones provinieron de rodales adultos de *E. globulus* ubicados en la V, VI y X Región, obteniendo la información a través del volteo y medición de los árboles.

Se utilizó el ajuste de un modelo según área geográfica y un modelo a nivel general. Al analizar los resultados se concluye que el modelo de Spurr (1952) sería el más recomendable para su utilización en cada zona.

La función desarrollada por Spurr corresponde a:

$$V = a + b*(DAP^2)*H$$

donde:

V = Volumen en m<sup>3</sup> ssc, desde la altura de tocón hasta la altura de un diámetro límite de 5 cm con corteza.

## ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS GLOBULUS* SEGUN ENSAYOS DE INFOR EN LA QUINTA REGION

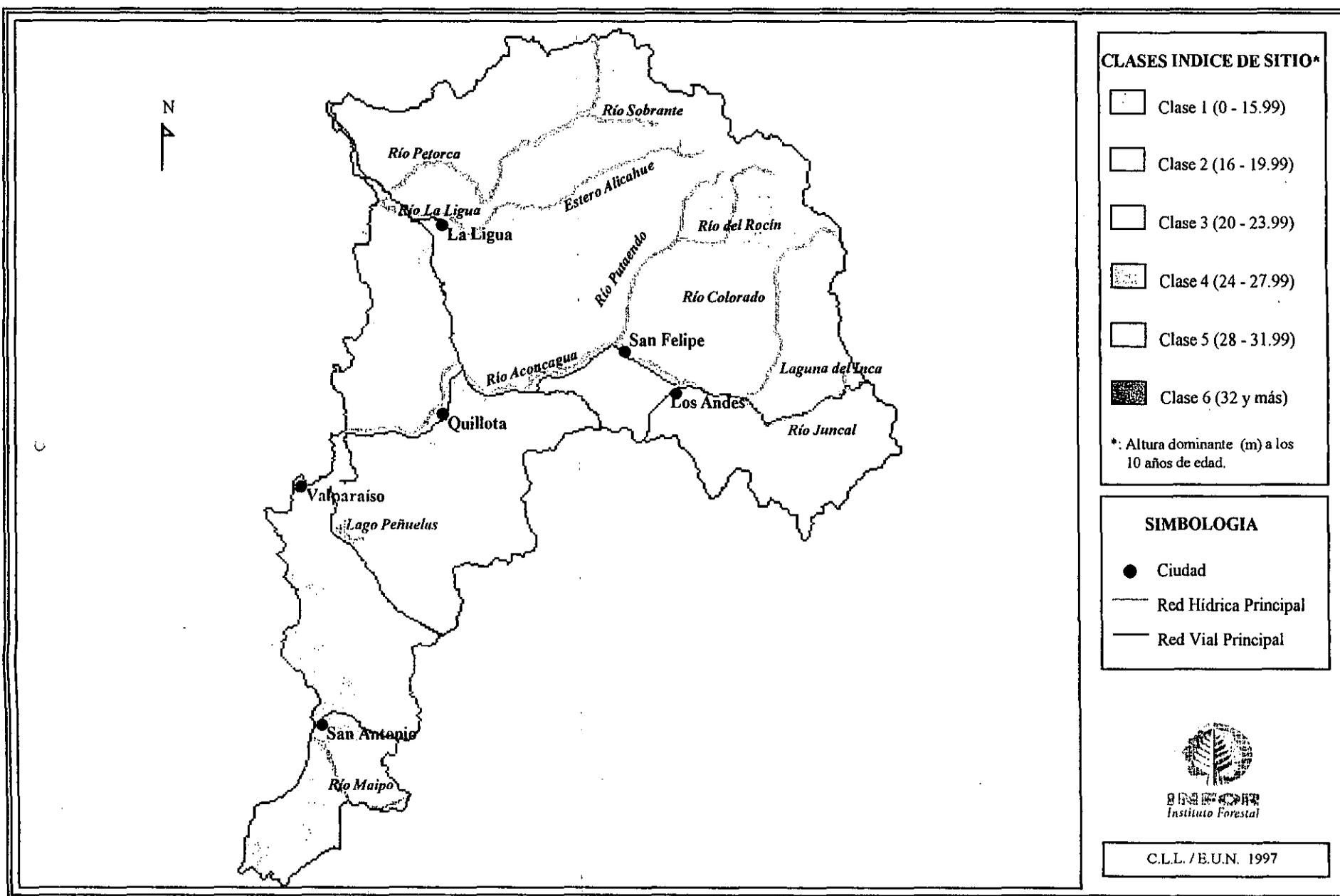
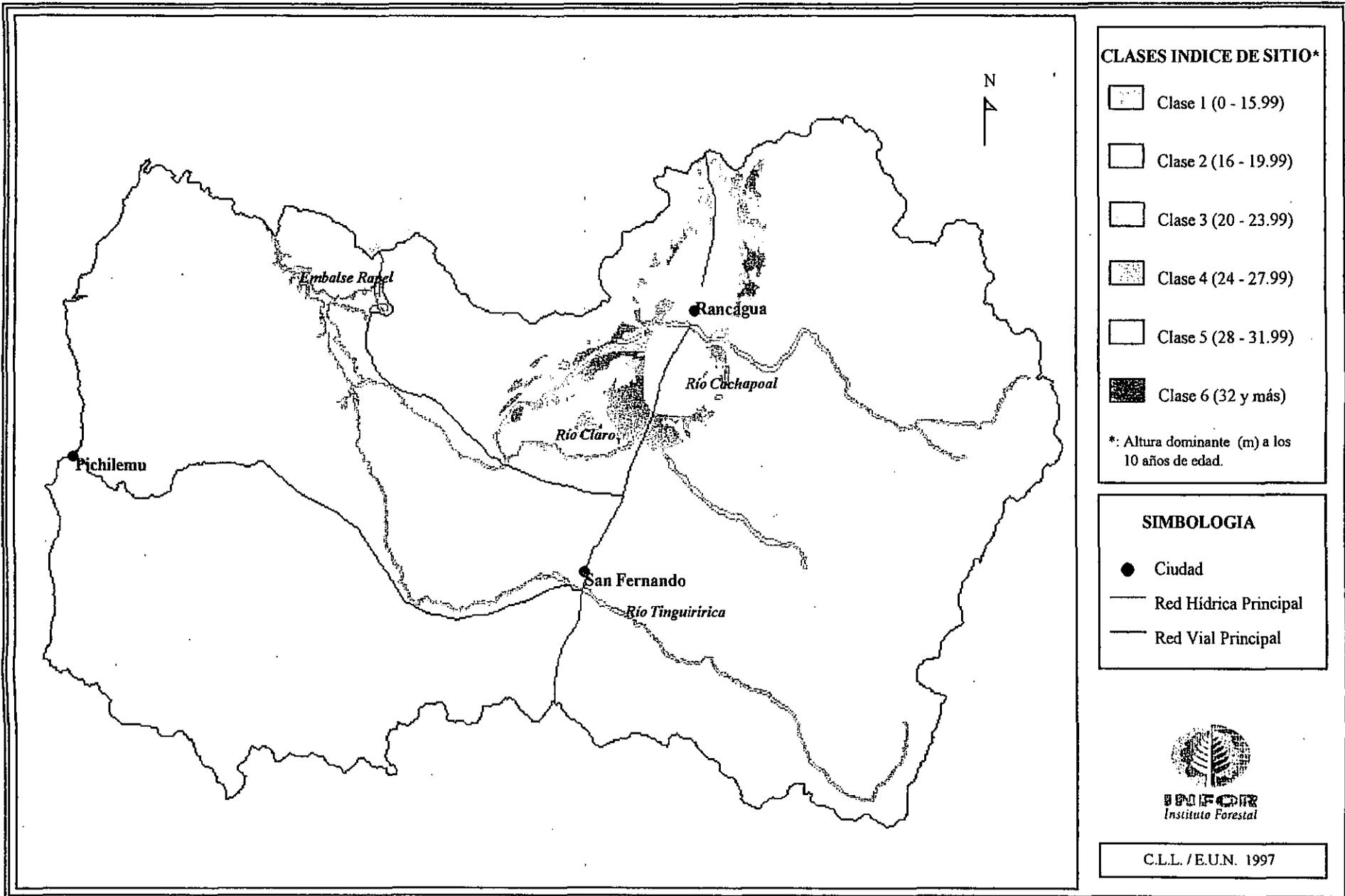
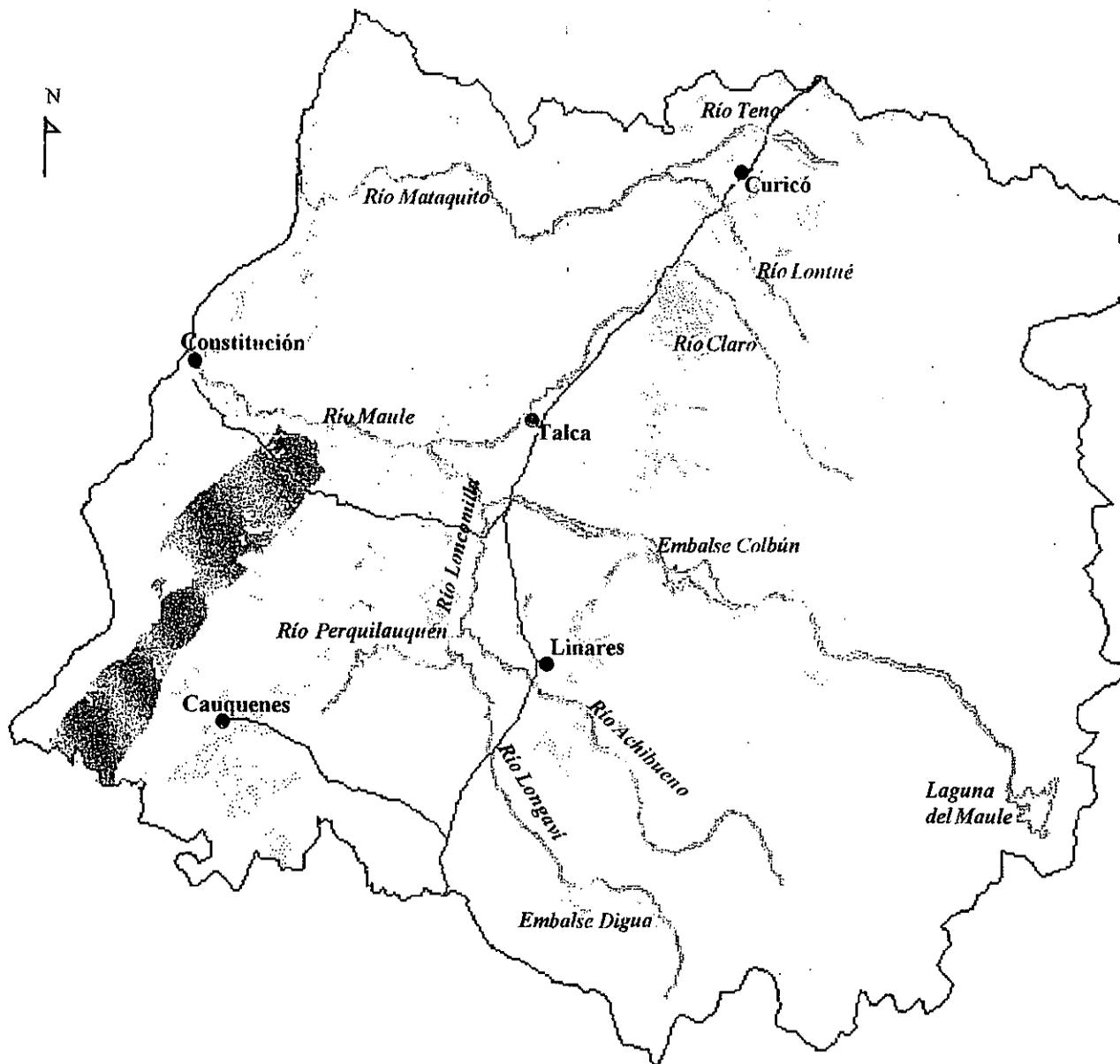


Figura Nº 1. Zonas de Isocrecimiento potencial para Eucalyptus, según especie y región.

# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS GLOBULUS* SEGUN ENSAYOS DE INFOR EN LA SEXTA REGION



# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS GLOBULUS* SEGUN ENSAYOS DE INFOR EN LA SEPTIMA REGION



### CLASES INDICE DE SITIO\*

-  Clase 1 (0 - 15.99)
-  Clase 2 (16 - 19.99)
-  Clase 3 (20 - 23.99)
-  Clase 4 (24 - 27.99)
-  Clase 5 (28 - 31.99)
-  Clase 6 (32 y más)

\*: Altura dominante (m) a los 10 años de edad.

### SIMBOLOGIA

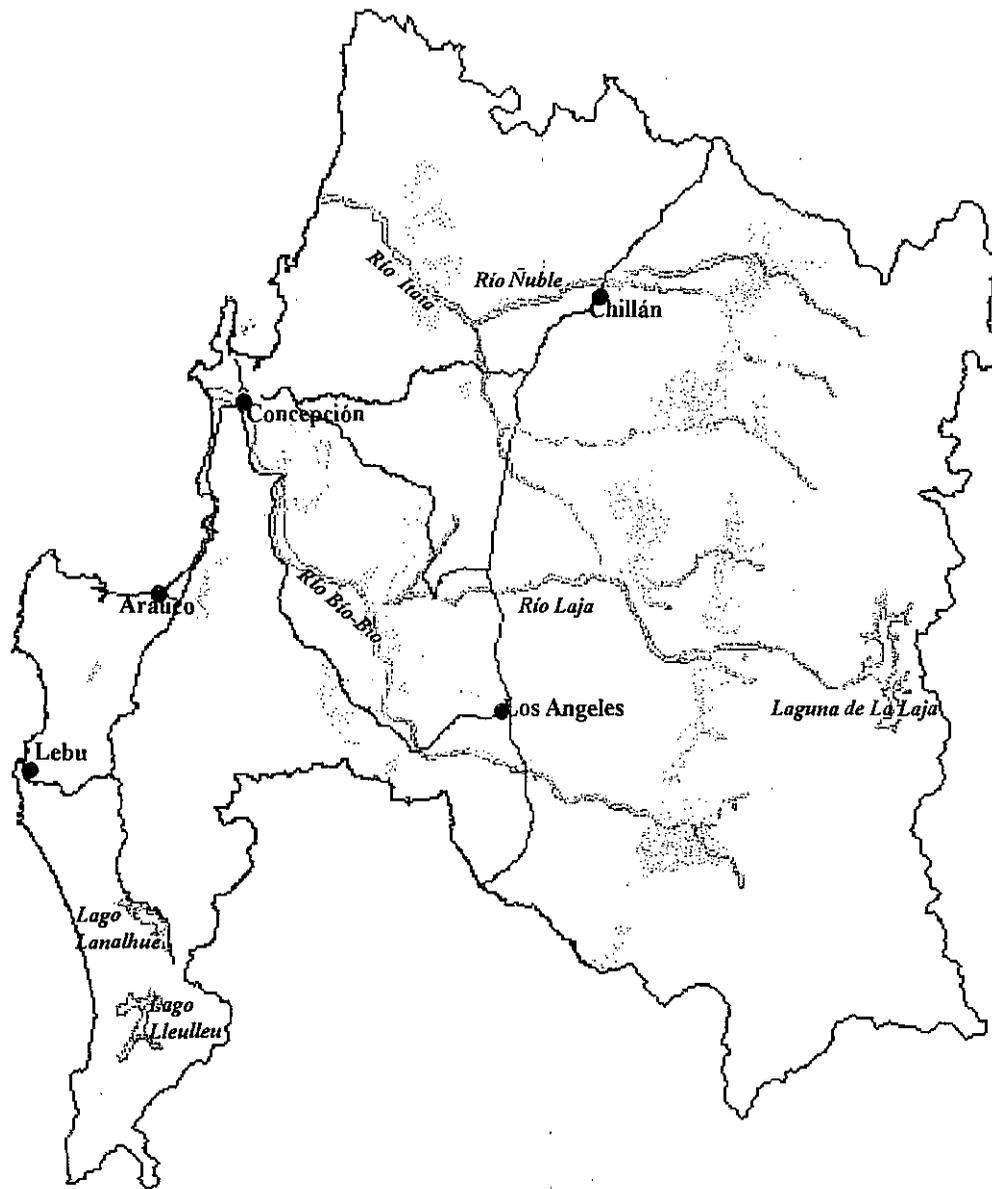
-  Ciudad
-  Red Hídrica Principal
-  Red Vial Principal



**INFOR**  
Instituto Forestal

C.L.L. / E.U.N. 1997

# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS GLOBULUS* SEGUN ENSAYOS DE INFOR EN LA OCTAVA REGION



### CLASES INDICE DE SITIO\*

- Clase 1 (0 - 15.99)
- Clase 2 (16 - 19.99)
- Clase 3 (20 - 23.99)
- Clase 4 (24 - 27.99)
- Clase 5 (28 - 31.99)
- Clase 6 (32 y más)

\*: Altura dominante (m) a los 10 años de edad.

### SIMBOLOGIA

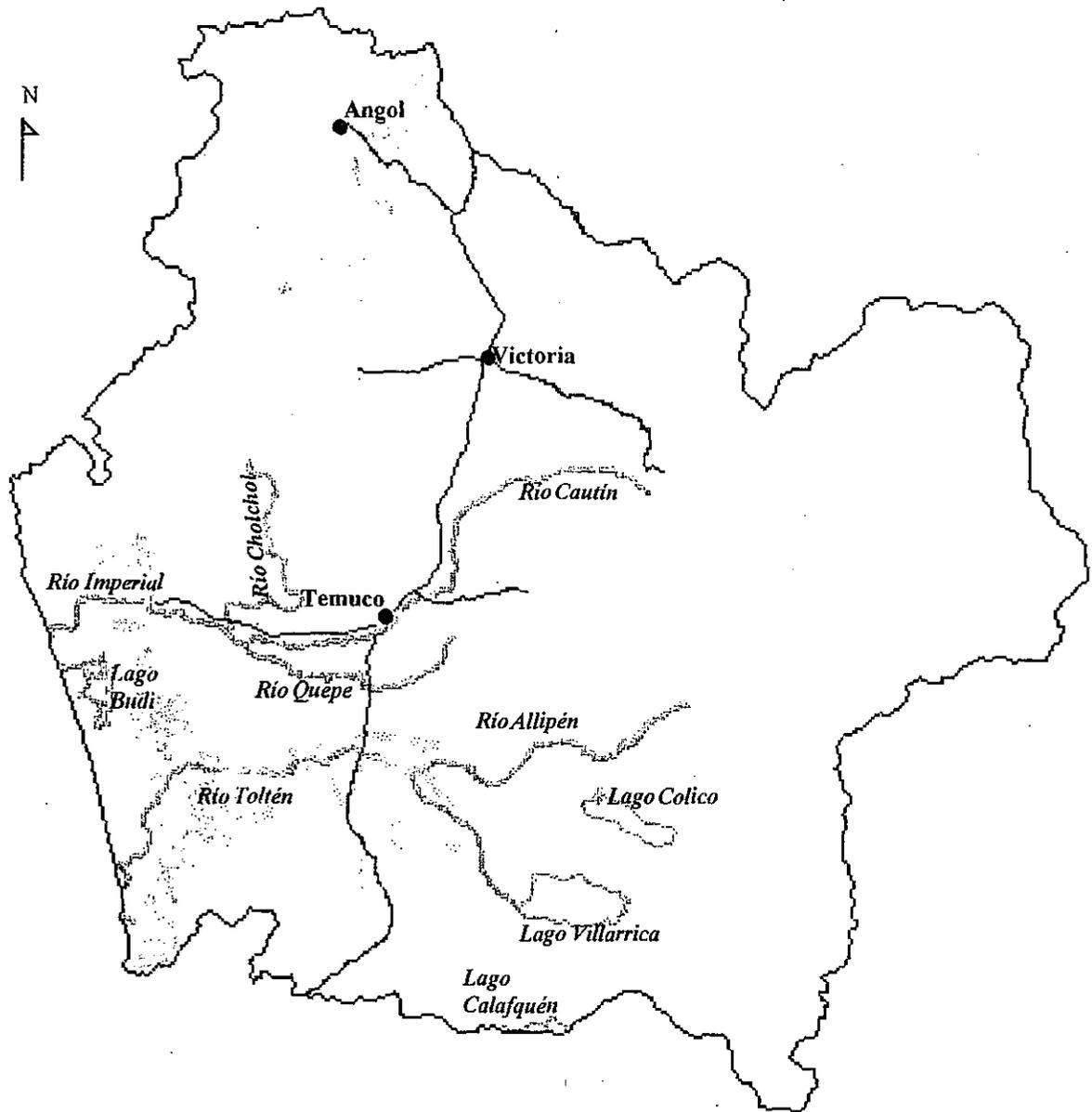
- Ciudad
- Red Hídrica Principal
- Red Vial Principal



**INFOR**  
Instituto Forestal

C.L.L. / E.U.N. 1997

# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS GLOBULUS* SEGUN ENSAYOS DE INFOR EN LA NOVENA REGION



### CLASES INDICE DE SITIO\*

- Clase 1 (0 - 15.99)
- Clase 2 (16 - 19.99)
- Clase 3 (20 - 23.99)
- Clase 4 (24 - 27.99)
- Clase 5 (28 - 31.99)
- Clase 6 (32 y más)

\*: Altura dominante (m) a los 10 años de edad.

### SIMBOLOGIA

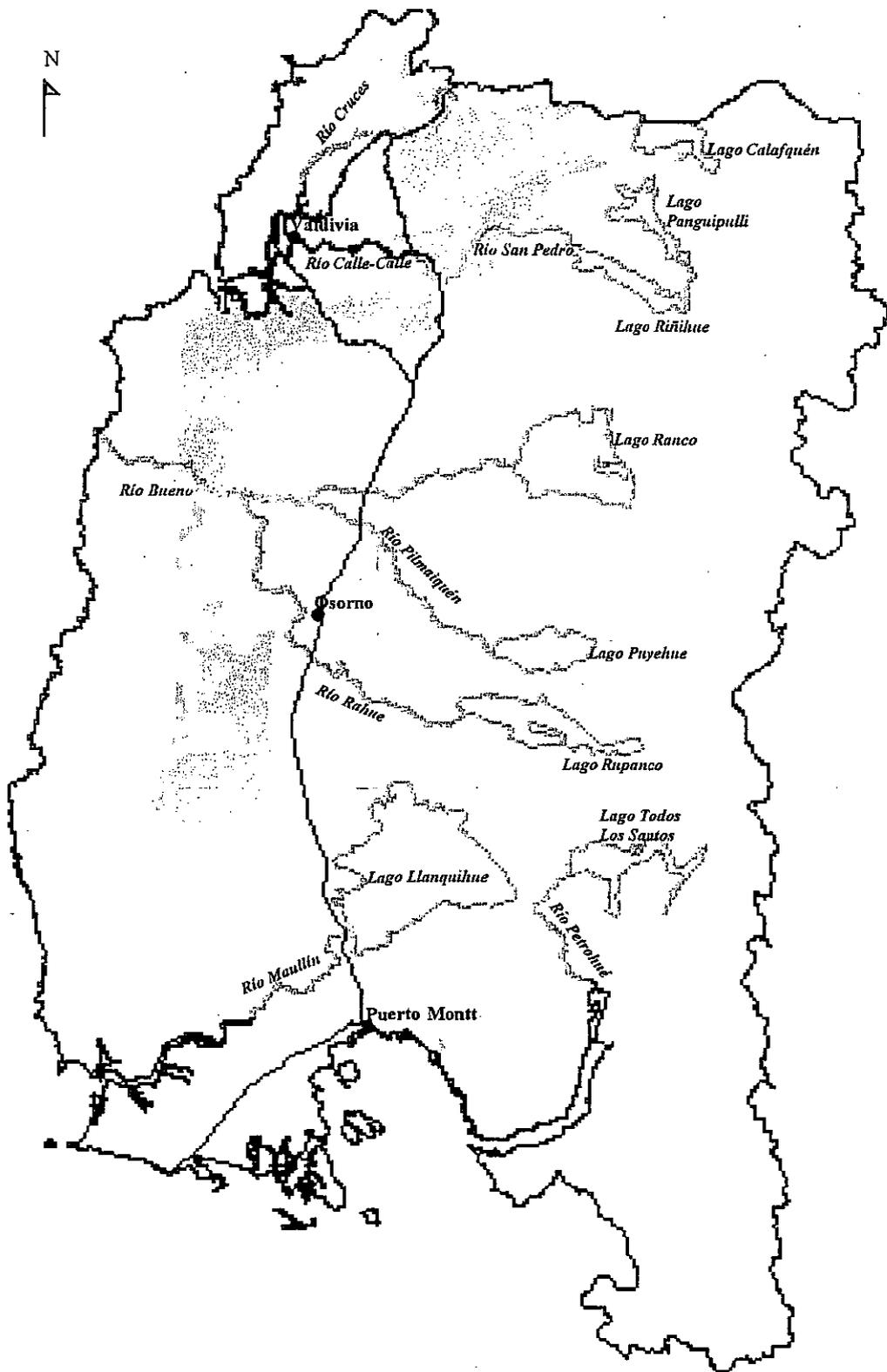
- Ciudad
- Red Hídrica Principal
- Red Vial Principal



**INFOR**  
Instituto Forestal

C.L.L. / E.U.N. 1997

# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS GLOBULUS* SEGUN ENSAYOS DE INFOR EN LA DECIMA REGION



## CLASES INDICE DE SITIO\*

-  Clase 1 (0 - 15.99)
-  Clase 2 (16 - 19.99)
-  Clase 3 (20 - 23.99)
-  Clase 4 (24 - 27.99)
-  Clase 5 (28 - 31.99)
-  Clase 6 (32 y más)

\*: Altura dominante (m) a los 10 años de edad.

## SIMBOLOGIA

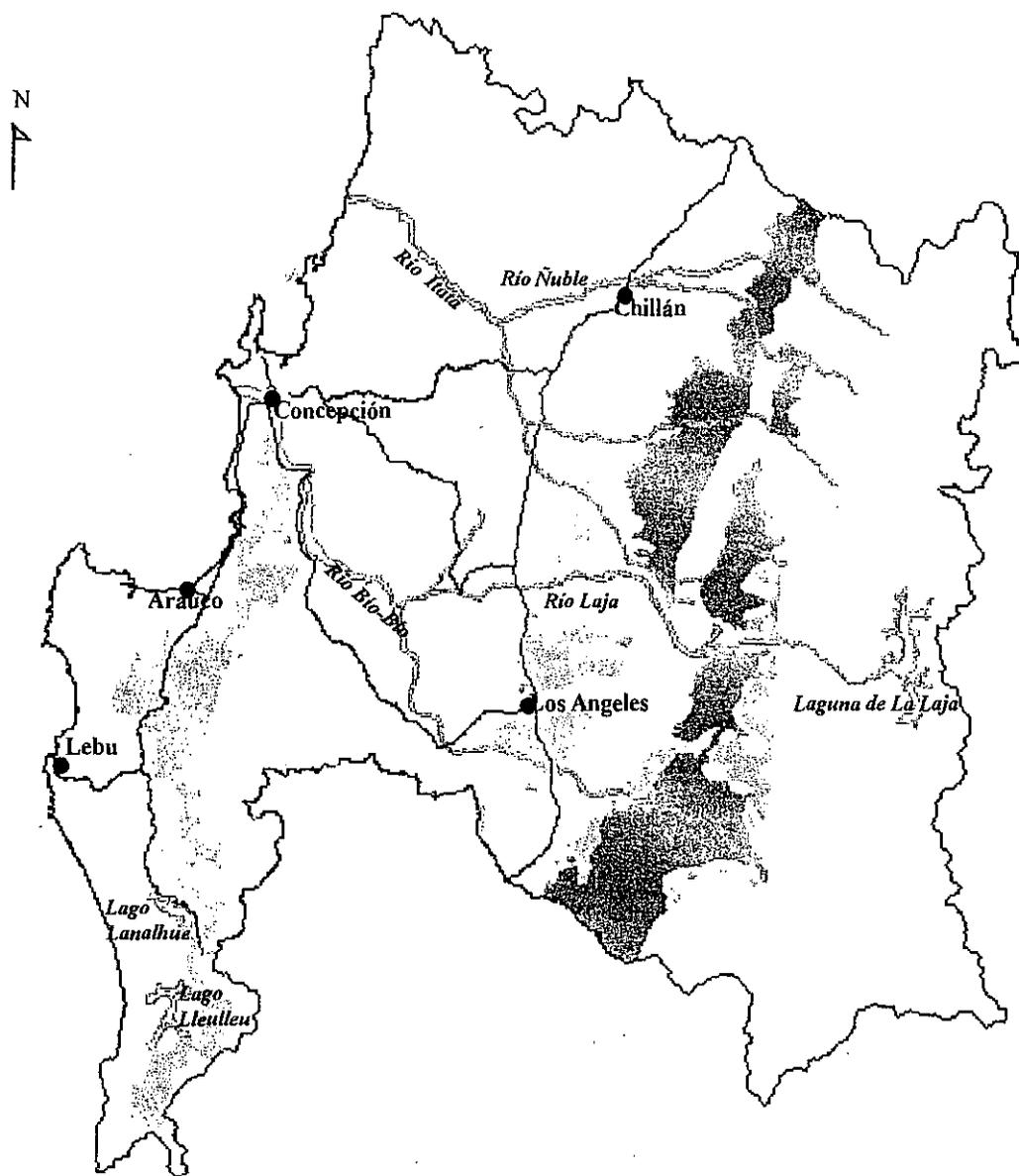
-  Ciudad
-  Red Hidrica Principal
-  Red Vial Principal



**INFOR**  
Instituto Forestal

C.L.L. / E.U.N. 1997

# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS NITENS* SEGUN ENSAYOS DE EMPRESAS EN LA OCTAVA REGION



### CLASES INDICE DE SITIO\*

-  Clase 1 (0 - 15.99)
-  Clase 2 (16 - 19.99)
-  Clase 3 (20 - 23.99)
-  Clase 4 (24 - 27.99)
-  Clase 5 (28 - 31.99)
-  Clase 6 (32 y más)

\*: Altura dominante (m) a los 10 años de edad.

### SIMBOLOGIA

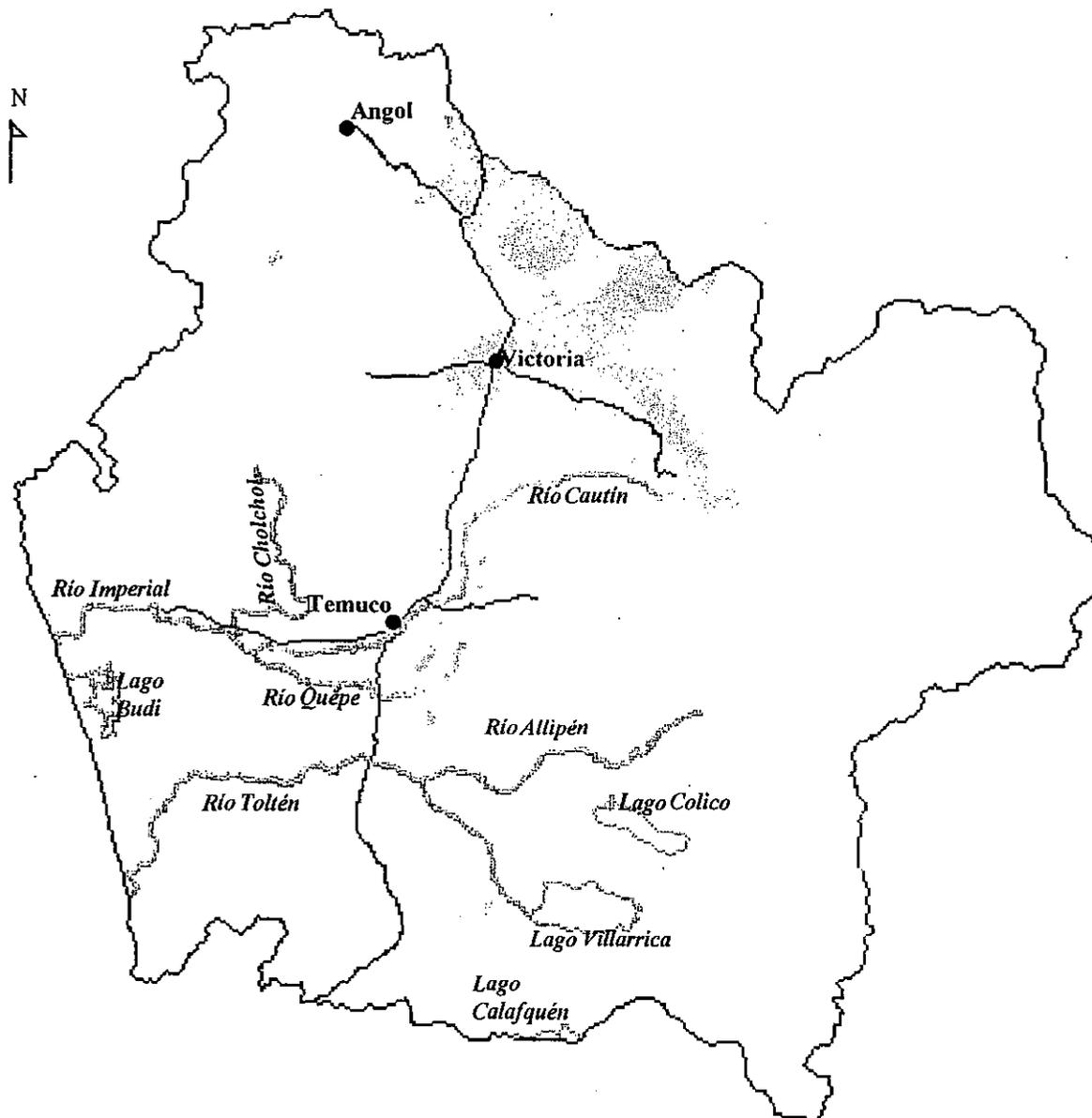
-  Ciudad
-  Red Hídrica Principal
-  Red Vial Principal



**INFOR**  
Instituto Forestal

C.L.L. / E.U.N. 1997

# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS NITENS* SEGUN ENSAYOS DE EMPRESAS EN LA NOVENA REGION



### CLASES INDICE DE SITIO\*

-  Clase 1 (0 - 15.99)
-  Clase 2 (16 - 19.99)
-  Clase 3 (20 - 23.99)
-  Clase 4 (24 - 27.99)
-  Clase 5 (28 - 31.99)
-  Clase 6 (32 y más)

\*: Altura dominante (m) a los 10 años de edad.

### SIMBOLOGIA

-  Ciudad
-  Red Hidrica Principal
-  Red Vial Principal

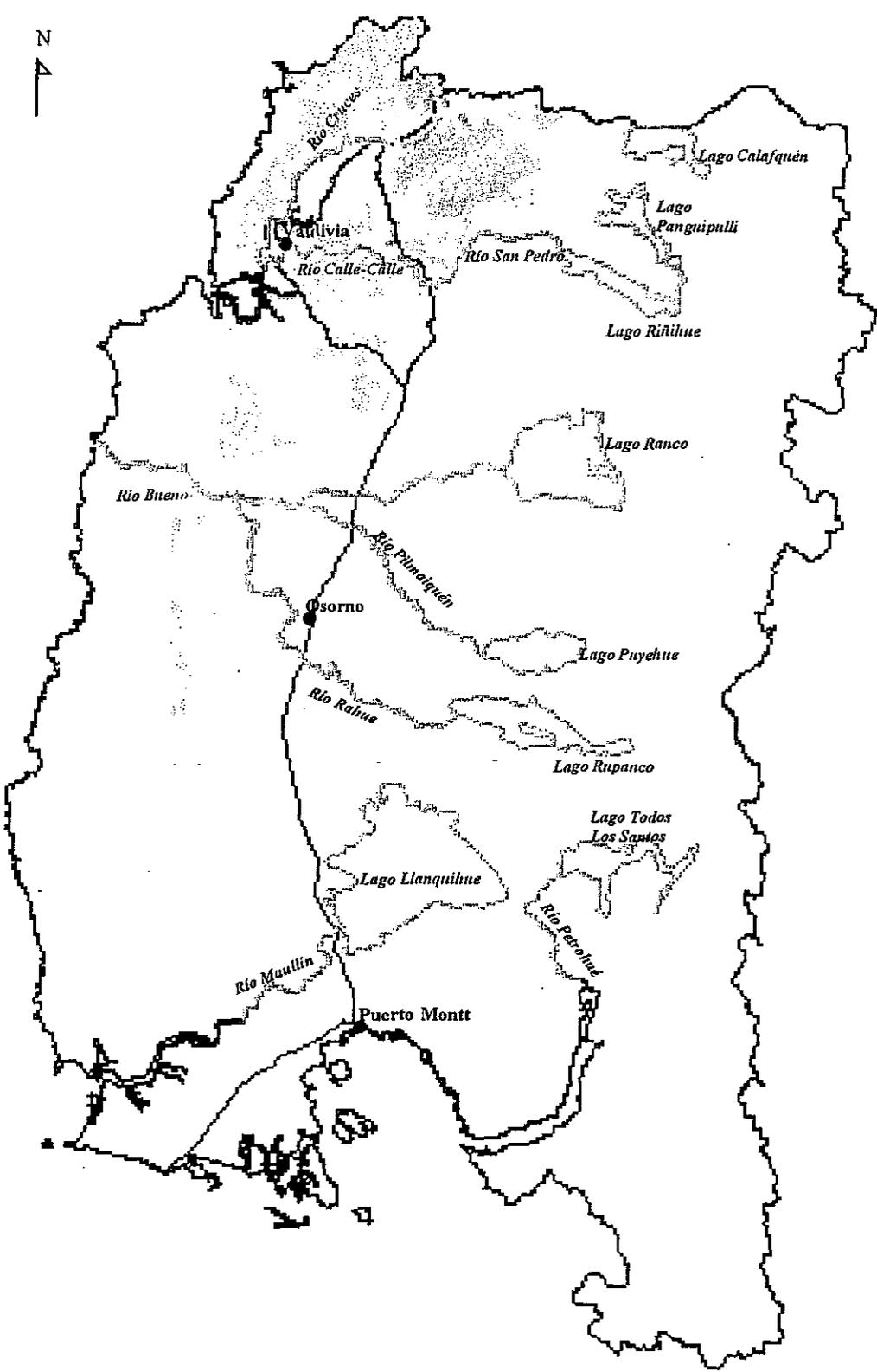


**INFOR**  
Instituto Forestal

C.L.L. / E.U.N. 1997

# ZONAS DE ISOCRECIMIENTO POTENCIAL PARA *EUCALYPTUS NITENS* SEGUN ENSAYOS DE EMPRESAS EN LA DECIMA REGION

N  
↑



## CLASES INDICE DE SITIO\*

-  Clase 1 (0 - 15.99)
-  Clase 2 (16 - 19.99)
-  Clase 3 (20 - 23.99)
-  Clase 4 (24 - 27.99)
-  Clase 5 (28 - 31.99)
-  Clase 6 (32 y más)

\*: Altura dominante (m) a los 10 años de edad.

## SIMBOLOGIA

-  Ciudad
-  Red Hídrica Principal
-  Red Vial Principal



DAP = DAP con corteza, en centímetros.  
 H = Altura total, en metros.  
 a, b = Constantes.

Las funciones obtenidas son confiables en sus estimaciones, pero se debe considerar que su construcción se basa en información proveniente de rodales adultos de eucalipto. El desarrollar modelos más eficientes dependerá de aumentar la base de datos requerida en su construcción, y de las necesidades de manejo para eucalipto.

Los resultados de este estudio fueron publicados en la revista Ciencia e Investigación Forestal que edita INFOR, en el mes de Diciembre de 1996. (Ciencia e Inv. Forestal 10(1) : 084-119). En el Anexo N°6 se presenta una copia de este documento.

### ***Actividad 2: Estudio para el diseño de ensayos de monte bajo y monte medio en E. globulus.***

Estos estudios deberían entregar la información de crecimiento y volumetría que permitan la evaluación técnica y económica del manejo de este tipo de bosques. Esto es fundamental en la toma de decisiones de los productores de eucalipto, especialmente *E. globulus*, ya que actualmente deben elegir entre continuar con un monte bajo, ó extraerlo y plantar nuevamente con material mejorado genéticamente.

Como no se dispone de antecedentes confiables en Chile acerca de las diferencias que se podrían generar entre un rodal de segundo crecimiento y uno proveniente de semilla mejorada, no es posible asegurar la superioridad de uno y otro tipo de cultivo.

Entonces, es interesante generar una línea de investigación que aborde el manejo del monte bajo y monte medio, especialmente en la distribución nacional del *E. globulus*, abordando todos sus aspectos, incluyendo trabajar con material proveniente de plantas con algún grado de mejoramiento. Por esta razón, se trabajó en el diseño de estos experimentos, en lo que se refiere al tipo y superficie de parcela, tratamiento a aplicar, número de repeticiones, etc., para su ofrecimiento a potenciales interesados en el tema.

Luego de revisiones bibliográficas y consultas con empresas e interesados se determinó que un diseño factorial con tres repeticiones y tres réplicas (bloques) sería el más adecuado a los objetivos del ensayo. Las parcelas serían de 500 m<sup>2</sup> (25 X 20 m). El ensayo requerirá que en una parcela se realice la extracción de los árboles para favorecer la regeneración y poder manejar el área como un monte bajo. En otra parcela se extraerá una hilera por medio para generar un monte medio, mientras que la tercera parcela constituirá el testigo (monte alto) el cual será generado a partir de semilla. El ensayo deberá instalarse en rodales de *E. globulus* de entre 8 a 10 años de edad.

El diseño del ensayo se presenta en la Figura N°2.

Este diseño esta actualmente en conversaciones con empresas interesadas en su instalación.

Figura N°2. Diseño del ensayo de manejo de monte bajo y monte medio en eucalipto.



**Actividad 3: Información adicional para el manejo forestal del eucalipto basada en ensayos de INFOR (relaciones funcionales)**

El proyecto CORFO de eucalipto se centró principalmente en el manejo y estudio del *E. globulus*. Sin embargo, las nuevas y en constante aumento necesidades y requerimientos de información, ha ampliado la investigación hacia otras especies de eucalipto, específicamente acerca del manejo del *E. nitens*, *E. delegatensis*, y *E. camaldulensis*.

Es por ello que se revisaron los antiguos ensayos de INFOR, buscando aquellos que tuvieran que ver ya sea con espaciamiento y/o raleo utilizando las especies de eucalipto anteriormente nombradas. La utilidad de ellos podría estar en los resultados que se pueden obtener del análisis de los controles efectuados, en relación con los diferentes espaciamientos, raleos empleados, especies utilizadas y características de desarrollo adulto del eucalipto, especialmente importantes al momento de modelar el crecimiento y observar las asíntotas que se pueden presentar ya sea en diámetro o altura.

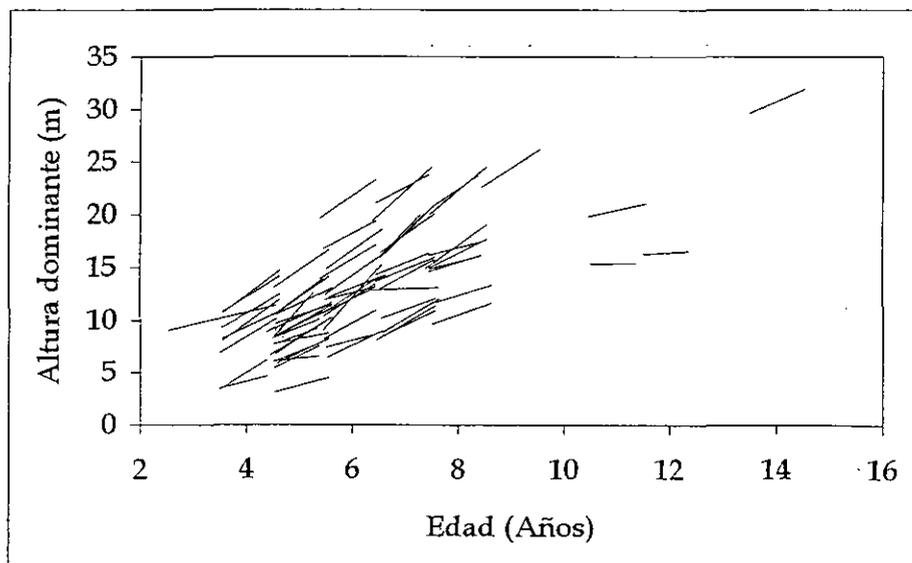
Producto de esta revisión, se ubicaron 8 ensayos entre la VI y X Región que podrían tener valor para los objetivos del proyecto, encontrándose estos, en general, en condiciones de ser utilizados. Al decidir utilizarlos o emplear los datos que de ellos se ha obtenido, ha sido necesario obtener la información de la situación actual exacta de estos ensayos, recuperar y/o averiguar donde están los antecedentes de los controles, e ir a terreno para seguir controlándolos y/o transformarlos en otro tipo de ensayo de interés.

En todo caso, se intentará recuperar la información para utilizarla en el proyecto de eucalipto, al menos como antecedente bibliográfico, preparando un documento y/o paper acerca del resultado de estos ensayos y su mantención en el tiempo. Este serviría como un antecedente inicial y un resultado de un tipo de estudio de los cuales no existen muchos en el país.

#### ***Actividad 4: Cálculo y revisión de variables por hectárea para las parcelas permanentes***

Se llevó a cabo el cálculo de las variables de rodal a partir de la información existente en cada medición de las parcelas permanentes. Las principales variables determinadas fueron las siguientes: Altura dominante del rodal (m), Densidad (Arboles/hectárea), Diámetro medio del rodal (cm), Área basal (m<sup>2</sup>/hectárea) y Volumen (m<sup>3</sup>/hectárea).

A continuación se presentan las gráficas de algunas variables de rodal versus edad (Gráfico N°10, N°11 y N°12), para las parcelas permanentes del banco de datos pertenecientes a INFOR.



**Gráfico N°10. Edad v/s altura dominante (parcelas de INFOR).**

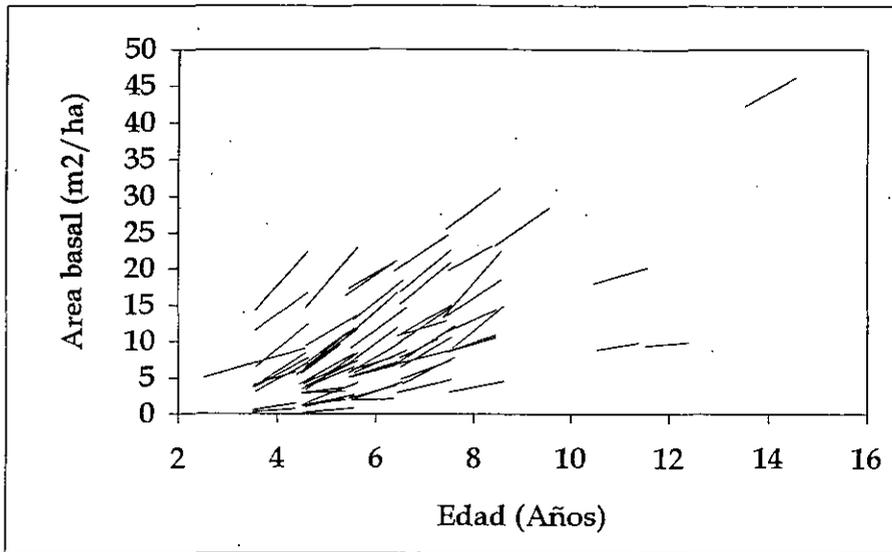


Gráfico N°11. Edad v/s área basal (parcelas INFOR).

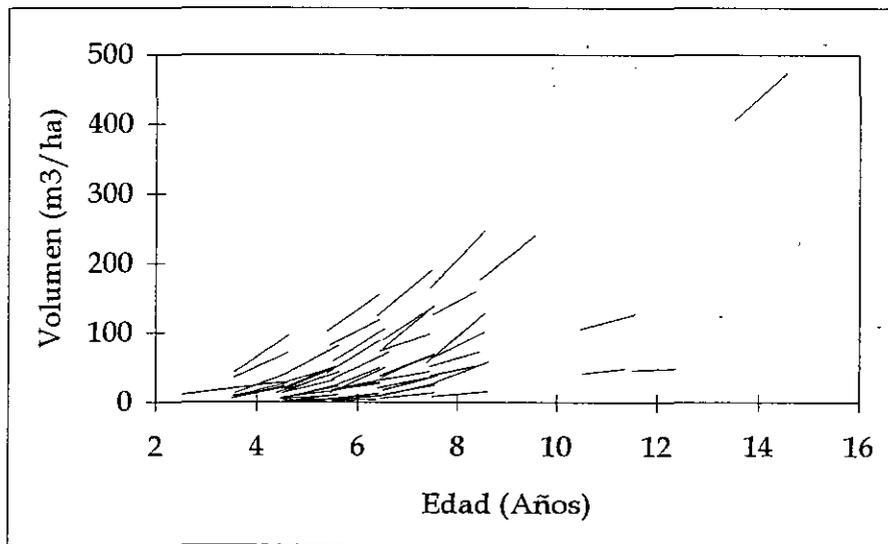


Gráfico N°12. Edad v/s volumen (parcelas INFOR).

Para la determinación de la altura dominante del rodal, así como la altura media del rodal, a partir de la muestra de alturas realizada en cada medición de la parcela permanente, es necesario ajustar para cada muestra un modelo diámetro - altura total. La muestra de altura para cada parcela consta generalmente de 16 árboles, con su respectiva medición de diámetro a 1,3 m. de altura sobre el suelo (DAP) y altura total (m).

Con este modelo posteriormente se estima la altura total de cada árbol perteneciente a la parcela.

Para cada muestra de altura se prueban los modelos expuestos en el Cuadro N°4. De los modelos utilizados se elige el que presenta un mejor ajuste (mejor coeficiente de correlación  $R^2$ ).

**Cuadro N°4 . Modelos Diámetro/Altura total.**

Modelo	Expresión
1	$H = a + b \text{ dap}$
2	$H = a + b \text{ dap}^{1/2}$
3	$H = a + b/\text{dap}$
4	$H = a + b \ln(\text{dap})$
5	$H = a + b \exp^{-.08 \text{ dap}}$

Donde :       $\text{dap}$  = diámetro (cm) a 1,3 m.  
                $H$  = altura total (m).

Finalmente, el volumen de cada árbol en la parcela se estima mediante la función de volumen conjunta (*E. globulus* y *E. nitens*) para árbol individual desarrollada por INFOR (1996) para árboles juveniles de un DAP no mayor a 20 cm. Esta función corresponde a:

$$V = -0,0013933776 + 0,000027376 * \text{DAP}^2 * H$$

donde:

$V$  = volumen sólido sin corteza del árbol ( $\text{m}^3$ ) , para un índice de utilización de 5 cm.

$\text{DAP}$  = diámetro del árbol a 1,3 m. (cm).

$H$  = altura total del árbol (m), estimada por modelos diámetro-altura total ajustados por parcela.

El resumen de las variables medidas y calculadas en cada parcela se presenta en el Anexo N°7.

#### **Actividad 5: Índices de sitio y crecimiento en altura.**

Se realizaron análisis y pruebas con la información de las parcelas permanentes para determinar nuevas ecuaciones de crecimiento en altura o mejorar las existentes basadas en los modelos tradicionales.

Sin embargo, se presentaron problemas en la estimación de parámetros debido al pequeño rango de edad en que se mueven los datos existentes, lo que se tradujo en parámetros inconsistentes e inestables, problemas que afectaron notablemente en la estimación de la asíntota en altura.

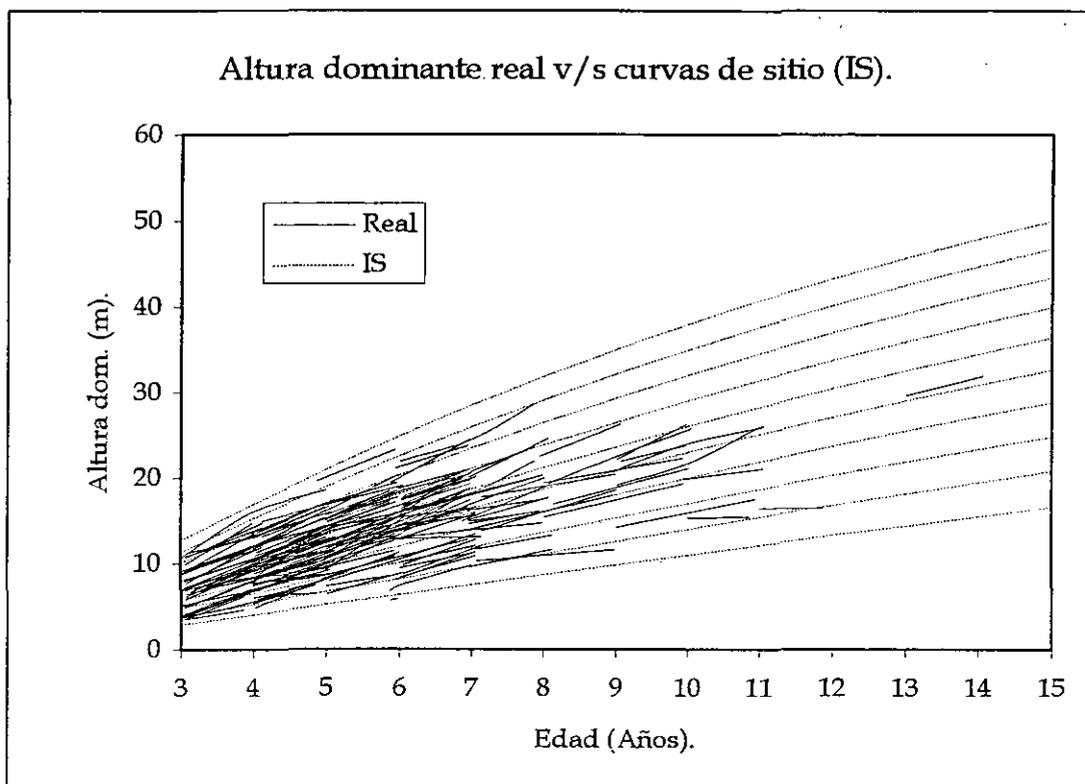


Gráfico. N°13. Series de crecimiento en altura dominante (medidas en parcelas permanentes) y altura dominante calculada con el modelo preliminar para diferentes sitios, v/s edad.

A pesar de las dificultades mencionadas, la información del proyecto permitió hacer una evaluación general del modelo existente (Gráfico N°13), el cual arrojó buenos resultados, teniendo en cuenta el estrecho margen de edades existentes.

Finalmente, y teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se optó por conservar el modelo preliminar de Índice de Sitio para *E. globulus* y *E. nitens* determinado en el documento del proyecto INFOR-FONDEF; "Índices de Sitio Preliminares para Eucalipto". Este modelo fue desarrollado en base a información de la base de datos INTROESP, perteneciente a INFOR. Base de datos que contiene información, que si bien es más antigua que la actual posee rangos de edades más amplios.

El modelo es el siguiente:

$$S = 75,3 \{1 - [1 - (H/75,3)^{0,863}]^{tc/t}\}^{1/0,863} \quad (1)$$

$$H = 75,3 \{1 - [1 - (S/75,3)^{0,863}]^{t/tc}\}^{1/0,863} \quad (2)$$

Donde :

$H$  = Altura dominante (m), de los 100 árboles mayores por hectárea.

$S$  = Índice de Sitio. Para edad clave de 10 años.

$t$  = Edad en años.

$tc$  = Edad índice o clave ; 10 años.

El sitio ( $S$ ) esta representado por la altura dominante del rodal a una edad clave determinada (Índice de sitio). Al usar la edad clave de 10 años, que está más cercana a las edades de rotación actuales, y calcular  $S$  con el modelo (1) para las parcelas permanentes del proyecto, se obtuvo un rango de Índices de Sitios que abarca mayoritariamente los valores entre 13 a 36 m. Este rango tiende a coincidir con el presentado en una clasificación realizada en Portugal para *E. globulus*. En el Cuadro N°5 se aprecia la clasificación de sitio realizada con la información de este proyecto.

Cuadro N°5. Categorías de Índices de Sitio.

Clase de Índice de Sitio (edad clave 10 años)	Rango de altura dominante (m)
I	>32
II	28 - 32
III	24 - 28
IV	20 - 24
V	16 - 20
VI	< 16

#### Actividad 6: Estudio de la Mortalidad natural.

Contactos directos con biómetras de Australia, coinciden con las apreciaciones locales en señalar la escasa mortalidad natural existente, por lo menos bajo los 14 años de edad. Esto siempre y cuando se omitan situaciones anormales, como condiciones climáticas severas (sequías o heladas fuertes). En este sentido la densidad de algunas parcelas permanentes se vio alterada por la sequía que afectó al país durante los años en que ejecutó el proyecto, en especial en aquellas ubicadas entre las V y VII regiones.

La información de mortalidad natural (mortalidad entre los 3 y 14 años de edad o de post - establecimiento) que se puede obtener con las actuales mediciones de las parcelas permanentes arroja valores promedios cercanos al 1% (Gráfico N°14).

Para modelos de crecimiento desarrollados en Portugal, simplemente se asumió una tasa de mortalidad constante determinada por el usuario (2% por defecto) para períodos de estimación sobre los 20 años de edad.

Con estos datos se probaron diversos modelos citados en la literatura, de los cuales los principales se presentan a continuación;

- $N_2 = N_1 (t_2 / t_1)^{B1} \text{EXP}[(B0 + B2 S) (t_2 - t_1)]$  (3)
- $N_2 = [ N_1^{B1} + B2 (t_2^{B3} - t_1^{B3}) ]^{(1 / B1)}$
- $\text{Ln} ( N_2 ) = \text{Ln} ( N_1 ) + B1 ( t_2^{B2} - t_1^{B2} )$

Donde :

$N_2$	= Número de arboles por hectárea en $t_2$ .
$N_1$	= Número de arboles por hectárea en $t_1$ .
$t_2$	= Edad del rodal en periodo 2.
$t_1$	= Edad del rodal en periodo 1.
S	= Índice de Sitio (m) .
B0, B1, B2, B3	= Parámetros.
Ln	= Logaritmo natural.

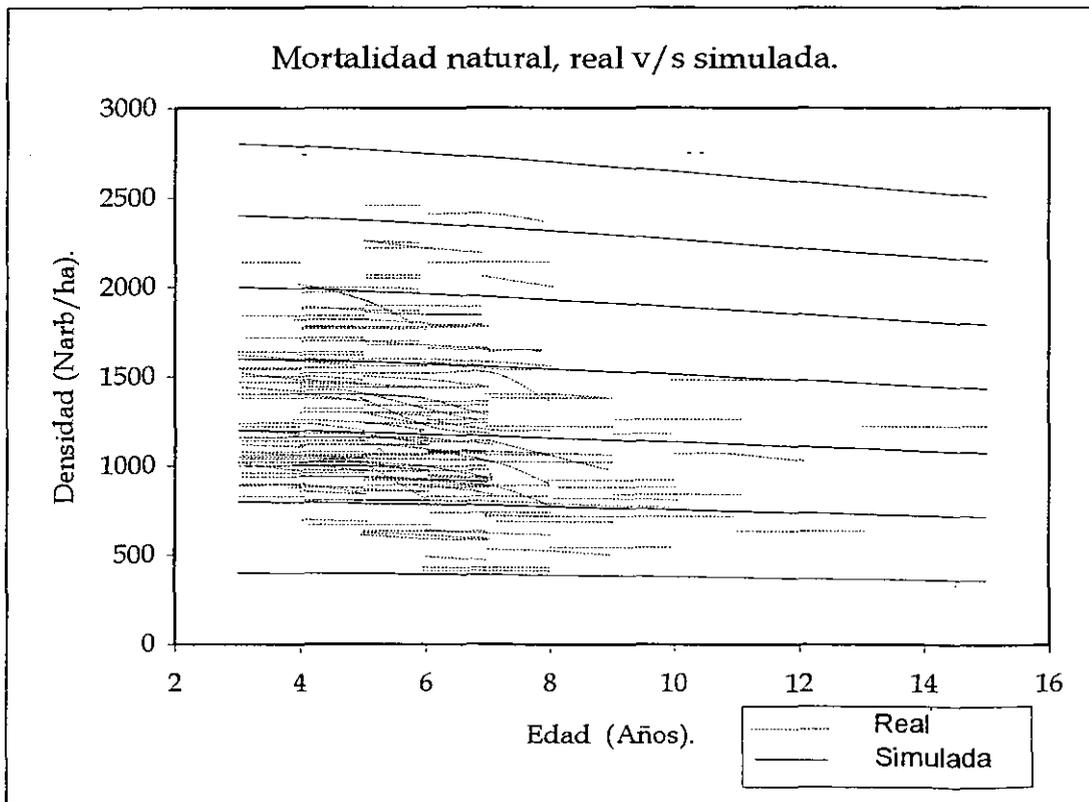


Gráfico N°14. Mortalidad medida y mortalidad estimada por modelo (3) , v/s edad.

La estimación de parámetros se llevó a cabo mediante la técnica de mínimos cuadrados no lineal. La información disponible no arrojó evidencia clara de diferencias significativas entre especies, por lo tanto se utilizaron los datos combinados para *E. globulus* y *E. nitens*. Los mejores resultados se lograron con el modelo (3), siendo la influencia del sitio, para los datos en uso, no significativa (parámetro B2=0). Valores de los parámetros estimados para el modelo de mortalidad natural, y otros estadísticos se presentan en el Cuadro N°6.

**Cuadro N°6. Parámetros estimados y estadísticos para ecuación de mortalidad.**

<b>Parámetros : B0 = - 0,014 ; B1 = 0,034; B2 = 0</b>
R <sup>2</sup> (no lineal, corregido) = 0,98
* ECM = 17,1 arb/ha.

\* ECM = Error cuadrático medio.

#### **Actividad 7: Modelo compatible de rendimiento y crecimiento para Área Basal.**

Con la información proveniente de las unidades experimentales se trabajó durante el desarrollo del proyecto con varios modelos de área basal. La modelación de incrementos no dio buenos resultados dada la tendencia poco definida de estos, producto de las tempranas edades de los datos. Otros modelos no se comportaron bien desde el punto de vista biológico esperado, viéndose afectados también por las limitaciones de edades de la información disponible.

La estimación de parámetros, de la misma forma que en la actividad anterior se llevó a cabo mediante la técnica de los mínimos cuadrados no lineal.

Tomando en cuenta que cerca del 80% de los datos corresponden a *E. globulus*, el análisis de la información para las dos especies más importantes (*E. globulus* y *E. nitens*) no condujo a conclusiones determinantes en cuanto a diferencias entre ellas. Es así que se combinaron los datos para ambas especies.

El volumen de información disponible no fue suficiente como para llevar a cabo un análisis objetivo en términos de desarrollar funciones diferenciadas, según zonas o regiones de crecimiento.

Algunos de los modelos aportados por la bibliografía y que fueron probados durante el proyecto se presentan a continuación:

$$\bullet B = \text{EXP}(B0 + B1 h + B2 n + B3 h n) \quad (4)$$

$$\bullet B = \text{EXP}(B0 + B1/E) N^{B2 + B3/E} H^{B4 + B5/E}$$

- $B = B_0 + B_1 / \sqrt{S E}$

Donde :

$$n = 100 / \sqrt{N}$$

$$h = 1/(H - 1,3)$$

$N$  = Número de árboles por hectárea.

$H$  = Altura dominante (m), de los 100 árboles mayores por hectárea.

$B$  = Área basal ( m<sup>2</sup> / ha ).

$E$  = Edad (años).

$S$  = Índice de Sitio (m).

$B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$  = Parámetros.

Los mejores resultados se lograron con una modificación del modelo (4). Esta alteración consistió en incorporar la variable Edad en forma de  $1/E$  ( $E$  = Edad en años). Así la adición de esta nueva variable, más las originales, originó el modelo definitivo (5) que permitió utilizar en mejor forma la información disponible en las parcelas permanentes. La función presentó buenas características en la estimación del rendimiento, además de presentar incrementos asociados compatibles con los observados en las series de crecimiento de las parcelas permanentes. El modelo así definido adopta la siguiente expresión:

- $B = \text{EXP}[B_0 + B_1 h + B_2 h (1/E) + B_3 n (1/E)]$  (5)

En la Cuadro N°7 se presentan los parámetros estimados y estadísticos del modelo seleccionado.

**Cuadro N°7. Parámetros estimados y estadísticos para ecuación de rendimiento (5).**

<b>Parámetros : <math>B_0 = 4,989</math> ; <math>B_1 = - 31,746</math> ; <math>B_2 = 54,719</math> ; <math>B_3 = - 1,724</math></b>
$R^2$ (no lineal, corregido) = 0,86
ECM = 3,2 m <sup>2</sup> /ha.

El desempeño de la ecuación (5) al ser utilizada para estimar las series de crecimiento en área basal (6) se describe a continuación, presentándose en la Cuadro N°8 (estadísticos), los Gráficos N°15 y N°16 (gráfica de estimaciones) y Gráfico N°17 (residuos para las estimaciones). En otras palabras, se evalúa la estimación de las mediciones 2 y 3 a partir de las condiciones iniciales dadas por la medición 1 (edad 1, altura 1 y densidad 1). Además implícitamente se evalúa la capacidad predictora de las ecuaciones de crecimiento en altura (2) y de mortalidad natural (3). La estructura de la función de área basal es:

- $B_2 = B_1 (1 + \Delta B)$  (6)

$$B = [ B(2) - B(1) ] / B(1)$$

Donde :

$B_2$  = Área basal estimada a la edad 2.

$B_1$  = Área basal real o inicial a la edad 1.

$\Delta B$  = Incremento proporcional en área basal calculado.

$B(2)$  = Ecuación (5) evaluada en edad 2, altura 2 y densidad 2 (estimadas).

$B(1)$  = Ecuación (5) evaluada en edad 1, altura 1 y densidad 1 (condiciones iniciales medidas).

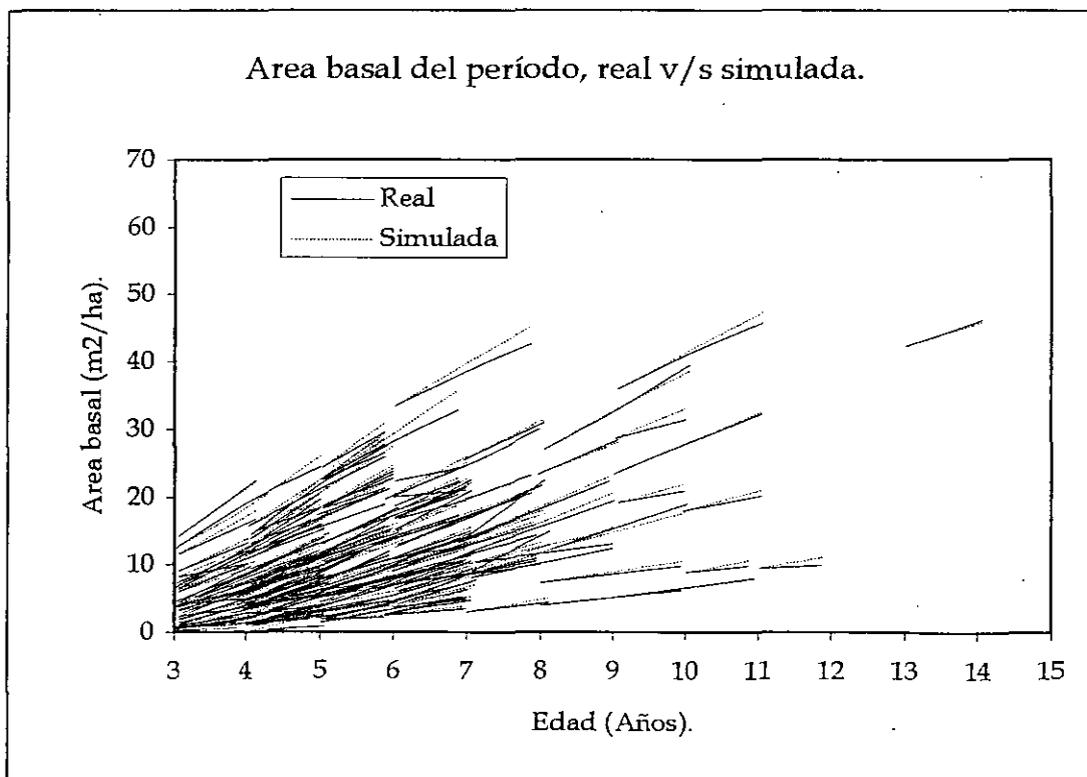
La densidad 2 y altura 2 son estimadas por (2) y (3) respectivamente a partir de las condiciones iniciales representadas por sus valores reales a la edad 1 (densidad 1 y altura 1). Este procedimiento se mantuvo también para la medición 3, es decir, tanto las mediciones 2 y 3 fueron estimadas en todas sus variables, a partir de las condiciones dadas por la medición 1.

**Cuadro N°8.** Estadísticos para estimaciones de series de crecimiento (área basal) por (6).

ECM = 1,531 m<sup>2</sup>/ha.

\* DIFA = - 0,109 m<sup>2</sup>/ha.

\* DIFA : Diferencia agregada o sesgo probable.



**Gráfico N°15.** Series de crecimiento real y estimadas por (6) v/s edad.

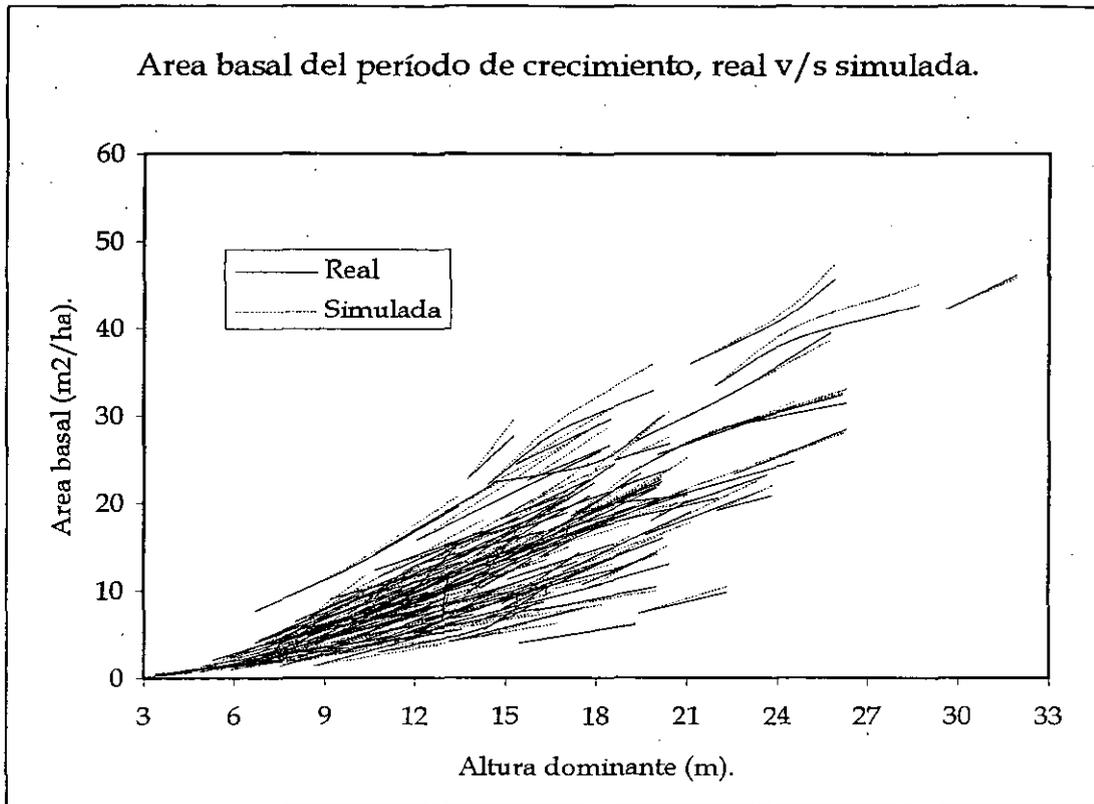


Gráfico N°16. Series de crecimiento real y estimadas por (6), v/s altura.

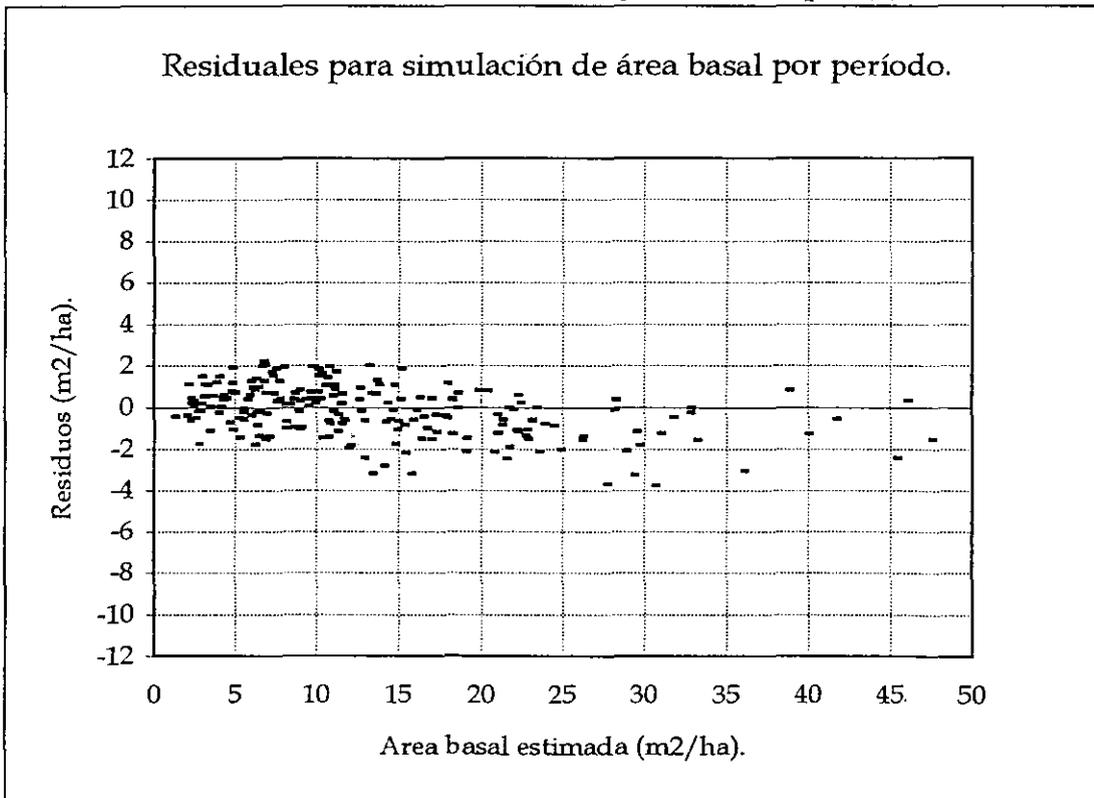


Gráfico N°17. Residuales para la estimación de las series de crecimiento en área basal.

En el Gráfico N°18 se presentan curvas de área basal simuladas con (2), (3) y (5) , para varios sitios y densidades (en el rango existente) , junto con las series de mediciones reales.

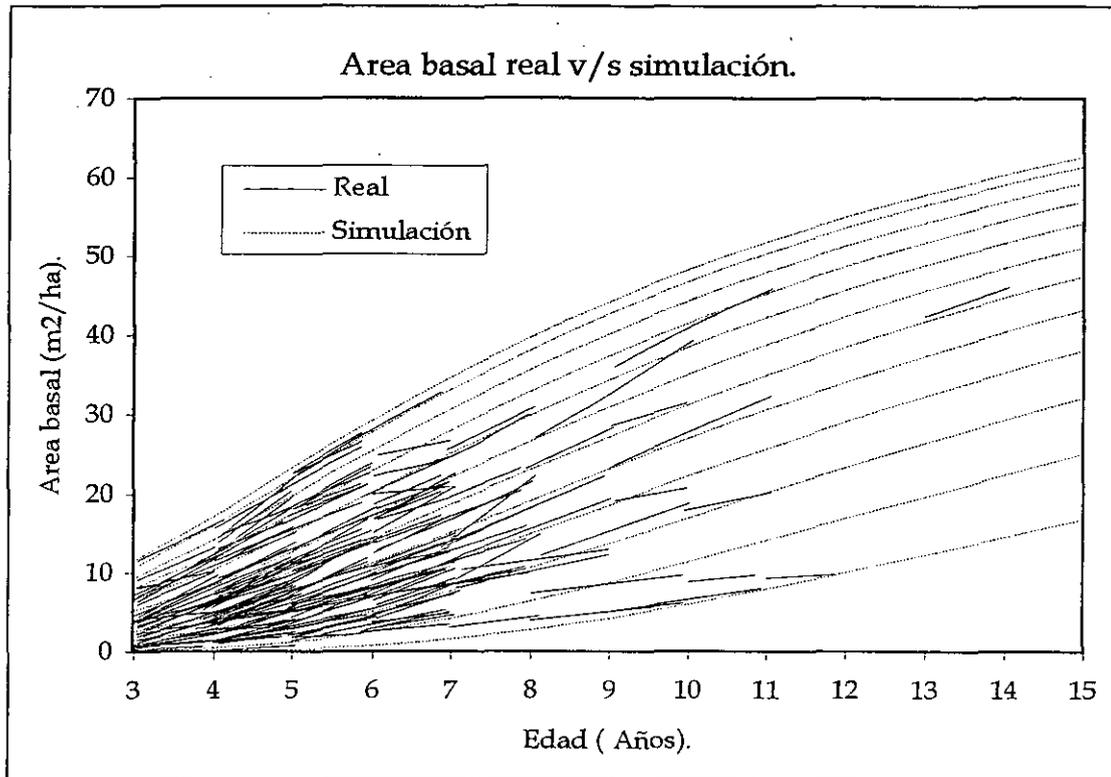


Gráfico N°18. Curvas de área basal simuladas y series reales, v/s edad.

**Actividad 8: Modelos de crecimiento y rendimiento para Eucalyptus (Modelo de predicción para Volumen).**

Se ha trabajado con la información recogida anualmente en el desarrollo de las diferentes funciones, que posteriormente formarán el modelo final de simulación completo de crecimiento. Específicamente esta actividad se centró en los modelos de volumen por hectárea para rodales jóvenes, dada la edad que presentaron los rodales muestreados y que es representativa del promedio de edad actual de las plantaciones y de las edades de rotación actualmente utilizadas (10 - 12 años para pulpa).

Principalmente, se lograron avances en el desarrollo de estimadores para los modelos de volumen por hectárea. Una amplia variedad de funciones estimadoras del volumen de rodal se encuentran en la literatura.

Entre las principales que se están probando se encuentran las siguientes:

$$\bullet V/B = B_0 + B_1 H \quad (7)$$

$$\bullet V = B_0 + B_1 B H$$

$$\bullet \text{Log } V = B_0 + B_1 \text{Log } B + B_2 \text{Log } H$$

donde :

V	= Volumen (m <sup>3</sup> /ha).
B	= Área basal (m <sup>2</sup> /ha).
H	= Altura dominante (m).
B <sub>0</sub> , B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub>	= Parámetros.
Log	= Logaritmo en base 10.

El modelo finalmente seleccionado es una modificación de (7), ya que se incorporaron al análisis nuevas variables explicatorias. Así el set de variables iniciales fue el siguiente:  $H$ ,  $H/N^{1/2}$ ,  $NH/B$ ,  $1/H$  y  $H/N$  ( $N$ =Número de árboles por hectárea). El uso de la variable independiente  $V/B$  (Volumen/Área basal) descrita en el Gráfico N°19 corresponde a un tipo de ponderación empleada para corregir el efecto que se produce cuando se estiman los parámetros con mínimos cuadrados lineal, como en este caso, en que los errores residuales tienden a ser aproximadamente proporcionales a los volúmenes.

Los volúmenes por hectárea de cada parcela permanente fueron computados a través de la función de volumen conjunta para árbol individual de *E. globulus* y *E. nitens* desarrollada por INFOR y que corresponde a:

$$V = -0,0013933776 + 0,000027376 \text{ Dap}^2 H \quad (8)$$

Donde :

V	=Volumen sólido sin corteza del árbol (m <sup>3</sup> ) para un índice de utilización de 5 cm.
Dap	=Diámetro del árbol a 1,3 m. (cm).
H	=Altura total del árbol (m).

Se trabajó con los datos combinados de las 2 especies, al no presentar diferencias claras entre ambas. La forma final del modelo se presenta a continuación, junto con los parámetros estimados y estadísticos (Cuadro N°9):

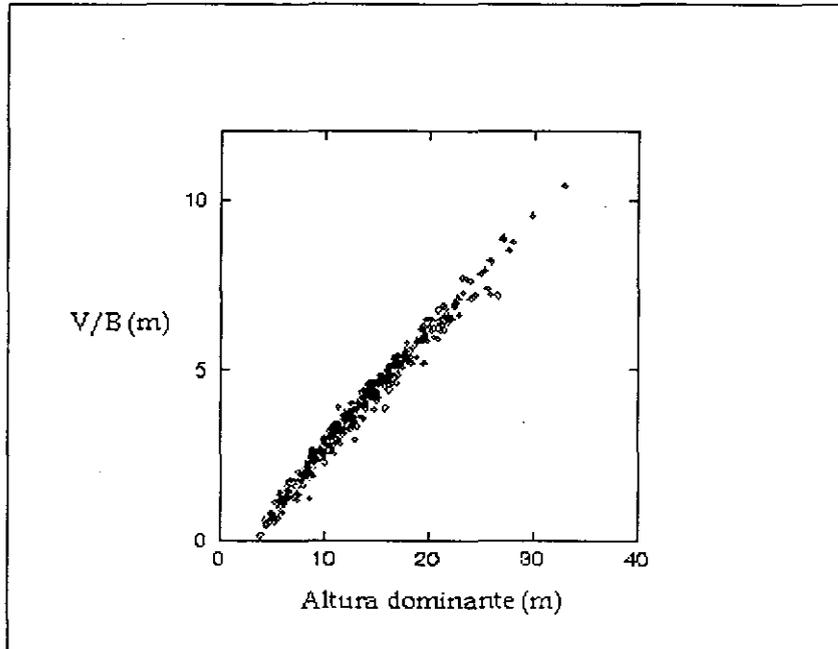
$$\bullet V/B = B_0 + B_1 H + B_2 (H/\sqrt{N}) + B_3 (NH/B) \quad (9)$$

donde:

$V$  = Volumen sólido sin corteza ( $m^3$  ssc/ha) para un índice de utilización de 5 cm.

**Cuadro N°9. Estadísticos para estimaciones de  $V/B$  por (9).**

<b>Parámetros : <math>B_0 = - 0.261</math> ; <math>B_1 = 0.323</math> ; <math>B_2 = 0.215</math> ; <math>B_3 = - 0.00013</math></b>
<b><math>R^2 = 0,989</math></b>
<b>ECM = 0,212 (m)</b>



**Gráfico N°19. Datos de  $V/B$  ( Volumen por hectárea/Área basal) v/s altura dominante para las parcelas permanentes.**

En el Gráfico N°20 se presenta el comportamiento de los residuos producidos por el modelo (9) v/s los valores estimados de  $V/B$ .

Al simular el comportamiento del volumen total para diferentes sitios y densidades (dentro de los rangos existentes), se obtienen las curvas expuestas en el Gráfico N°21. Estas curvas se comparan con las series de datos reales para volumen.

En el Gráfico N°22 se muestran diferentes rendimientos volumétricos estimados (IMA) para varias combinaciones de sitio y densidad.

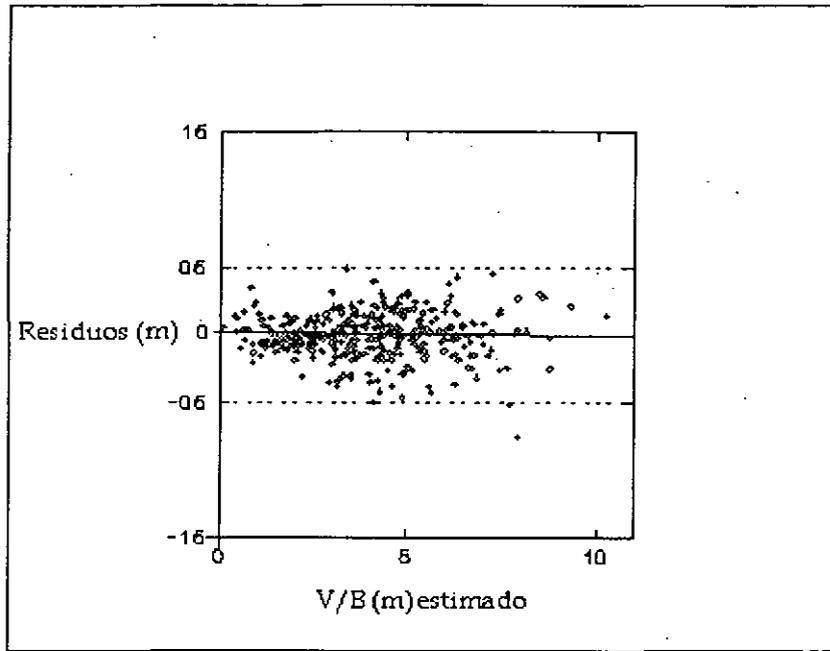


Gráfico N°20. Residuos para estimaciones de V/B con (9).

Como producto de las simulaciones para el volumen total se han acotado clases para el IMA (incremento medio anual) a los 10 años de edad (Cuadro N°10). De estas se desprende que los incrementos volumétricos medios anuales pueden variar en un amplio rango, afirmación que es corroborada por las observaciones en terreno. Esta característica se ve acentuada por el efecto del micrositio sobre el crecimiento del rodal.

Cuadro N°10. Clases de IMA ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) estimado a los 10 años.

Clase de IMA	( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ )
I	>40
II	30 - 40
III	20 - 30
IV	10 - 20
V <sup>3</sup>	<10

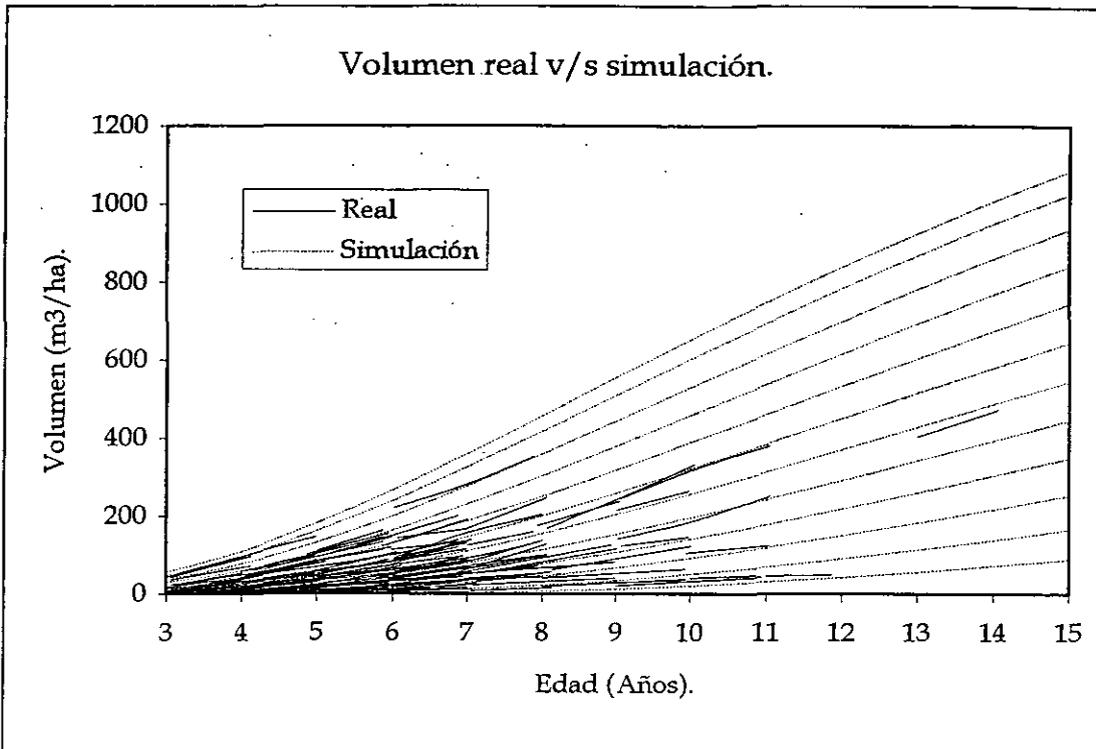


Gráfico N°21. Series medidas de volumen total y simulaciones, v/s edad.

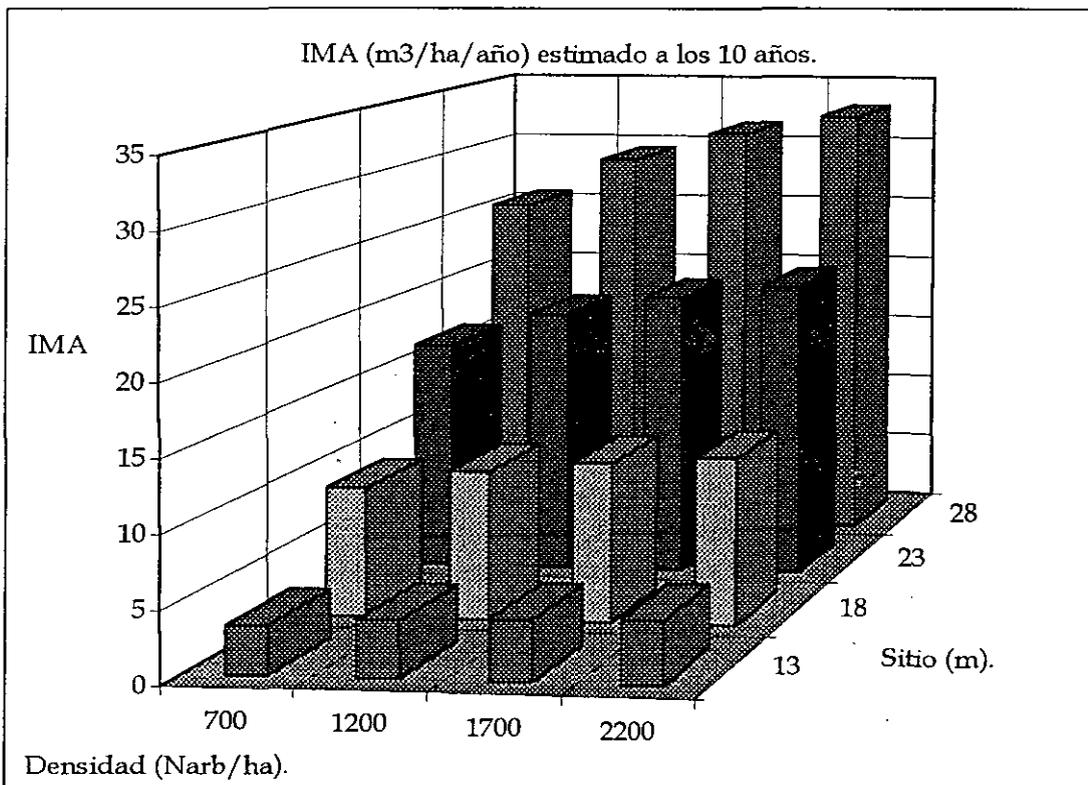


Gráfico N°22. IMA estimado para diferentes sitios y densidades.

***Actividad 9: Análisis de la información recogida desde los diferentes ensayos y de la bibliografía relacionada con el cultivo del eucalipto.***

Esta es una actividad recurrente durante el desarrollo del proyecto, analizando la información proveniente desde los ensayos y la bibliografía existente en temas relacionados con el manejo del eucalipto. Esta es utilizada como apoyo para la realización de diferentes actividades y, también, en la preparación de informes y publicaciones específicas.

***Actividad 10: Diseño del modelo de simulación de eucalipto.***

Todos las funciones y resultados obtenidos y desarrollados durante el proyecto fueron traspasadas a un sistema ordenador que dio origen a un simulador de crecimiento, llamado en su primera versión *EUCA21*.

Este es un programa computacional desarrollado para ambiente Windows 3.1. El objetivo principal de este modelo es la predicción del crecimiento de rodales de eucalipto a partir de las condiciones iniciales entregadas por el usuario. Permite proyectar la altura dominante, área basal, densidad y volumen cúbico del rodal. Además, como característica especial permite la estimación de la tabla de rodal o de frecuencia de diámetros, lo que en el futuro posibilitaría el escalamiento del simulador agregándole un módulo de obtención de productos, definidos estos por largos y diámetros límites de cada producto.

Cada uno de los resultados generados por una simulación es posible exportarlos a archivos, impresoras o generar presentaciones gráficas del desarrollo del rodal.

Los resultados más relevantes del proyecto se basan en la red de parcelas permanentes y en la obtención de funciones matemáticas para la determinación del crecimiento de los árboles de eucalipto y que se integraron en el modelo de simulación.

En este sentido, el modelo de simulación es sólo una herramienta o pantalla que utiliza las funciones matemáticas del proyecto para generar los resultados. Por esto se hace relevante la continuación de las investigaciones para la obtención de antecedentes que permitan ajustes a las funciones y modelos desarrollados, ampliando la cobertura geográfica, el número de especies y los regímenes de manejo utilizados .

En las Figuras N°3 y N°4 se presentan 2 pantallas obtenidas del modelo desarrollado al momento de utilizarlo en una simulación del crecimiento de un rodal de eucalipto.

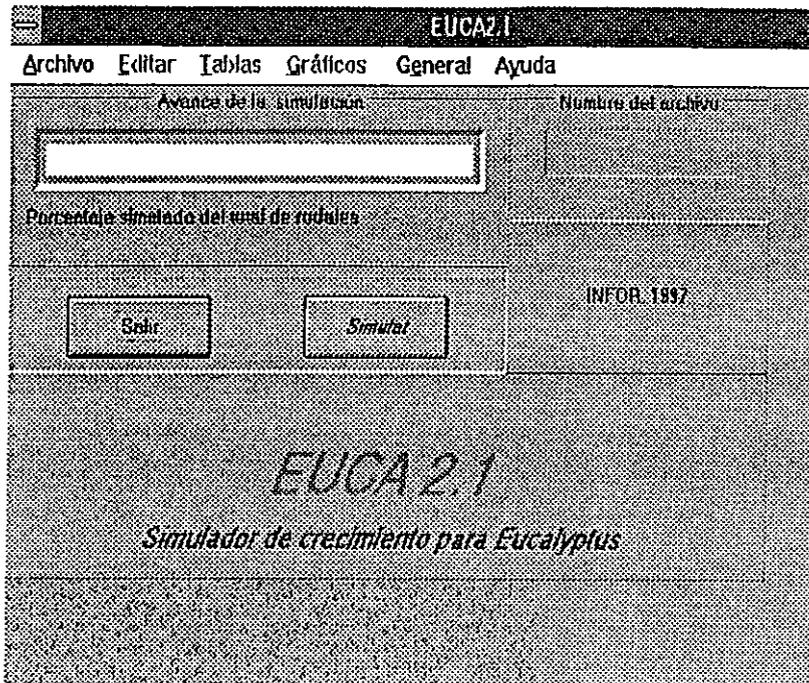


Figura N°3. Pantalla inicial del modelo de simulación del crecimiento para eucalipto, EUCA21.

Resultados por rodal							
Edad	Hdom	Dens	Abas	Volu	Deme	lmc	lma
5	16	1480	20,1	115,	13,1	6,2	4,
6	21,4	1468	26,3	178,5	15,1	6,	4,4
7	24,7	1457	32,3	252,2	16,8	5,7	4,6
8	27,8	1446	37,9	333,	18,3	5,2	4,7
9	30,7	1436	43,1	418,4	19,6	4,8	4,8
10	33,5	1425	47,9	506,4	20,7	4,4	4,8
11	36,1	1415	52,3	595,2	21,7	4,	4,8
12	38,6	1406	56,3	683,8	22,6	3,6	4,7
13	40,9	1396	59,9	771,1	23,4	3,3	4,6
14	43,1	1386	63,2	856,5	24,1	3,	4,5
15	45,2	1377	66,2	939,5	24,7	2,7	4,4

Figura N°4. Pantalla de la planilla de resultados del modelo de simulación.

### ***Actividad 11: Contactos con empresas***

El establecimiento de estudios conjuntos con empresas forestales relacionadas con el cultivo del eucalipto es un área que el proyecto ha propiciado. Es así como se establecieron conversaciones para la realización de estudios específicos con INFOR en temas relacionados con el crecimiento del eucalipto. Estas conversaciones deberán ser las bases para la formulación de un nuevo proyecto de investigación en relación con el manejo del eucalipto.

Este nuevo proyecto, además, debería integrar a otras áreas de interés forestal relacionadas con el eucalipto, como son el mejoramiento genético y la transformación primaria de la madera. Estos dos últimos temas están dentro de las líneas de investigación desarrolladas por INFOR, a través de su Gerencia de Investigación y Subgerencia de Industrias, respectivamente.

Esta nueva propuesta de investigación ha requerido de una coordinación del proyecto con el grupo de empresas colaboradoras y desarrollar algunas tareas específicas. Entre estas tareas se cuentan:

- Definir las áreas de interés geográficas de interés para las empresas.
- Efectuar una selección y clasificación de los temas de interés, de tal modo de ir estructurando la propuesta.
- Definir el aporte comprometido por parte del Instituto Forestal para la realización del proyecto.
- Determinar el grado de compromiso de las empresas en un futuro proyecto de manejo de Eucalipto. Entre otros, conocer si las empresas remedirán sus parcelas durante el período de formulación de una propuesta y hasta que comience un nuevo proyecto.

Los resultados alcanzados se pueden expresar como un programa preliminar o tentativo de trabajo para 4 años, dividido en 2 etapas de 2 años cada una. Estas actividades se pueden resumir en los siguientes puntos:

#### **A) *Actividades Año 1 y 2 :***

- Remedición de las parcelas permanentes instaladas hasta el día de hoy.
- Envío de las remediciones en disquete (información procesada) al INFOR por parte de las empresas.

- Actualización de bases de datos INFOR.
- Recopilar información del manejo histórico y del mejoramiento genético aplicados a las parcelas instaladas hasta hoy. Anexar dicha información a base de datos.
- Determinar diferencias de crecimiento con o sin manejo y con y sin mejora genética.
- Reajustar funciones de altura, área basal y mortalidad con los nuevos datos.
- Generar un modelo trozador.
- Investigar en técnicas estadísticas que permitan dado un volumen de información reducido, determinar macrozonas de crecimiento.
- Aumentar el número de parcelas permanentes de **E. nitens**.
- Instalación de ensayos de manejo: raleos, podas, fertilización, control de malezas, monte bajo y preparación del sitio.
- Elaborar un programa de medición para los nuevos tipos de ensayo.

**B) Actividades Años 3 y 4:**

- Remedición de las parcelas permanentes, de los ensayos de podas, raleos, manejo monte bajo y de los ensayos de espaciamiento instalados.
- Envío de las remediciones en disquete (información procesada) al INFOR por parte de las empresas.
- Actualización de bases de datos.
- Considerar en próximos ensayos los grados o etapas de mejoramiento existentes actualmente e incorporar los grados significativos de mejora genética que se vayan produciendo en el futuro.
- Determinar funciones de índice de sitio, altura, área basal y mortalidad separadas para **E. globulus** y **E. nitens**
- Generar un simulador de crecimiento independiente para cada especie.

- Analizar la información que se obtenga de los ensayos de espaciamento y modelar el crecimiento inicial del rodal (efecto de la densidad) y determinar las densidades de plantación que permitan el máximo crecimiento en volumen y área basal inicial.
- Profundizar en el estudio de la determinación de zonas de crecimiento para el Género *Eucalyptus*.
- Instalación de ensayos de manejo: raleos, podas, fertilización, monte bajo, control de malezas y preparación del sitio.
- Medición periódica de los ensayos. Envío de la información a INFOR.

### ***Actividad 12 : Preparación proyecto FDI.***

Producto de las conversaciones con empresas productoras de eucalipto, y teniendo en cuenta la red de parcelas permanentes existente, los recursos invertidos y las capacidades desarrolladas por INFOR en el estudio de este tema, es que en diciembre de 1997 se preparó un proyecto en eucalipto para ser presentado al Tercer Concurso de Proyectos FDI (CORFO).

El proyecto lleva por título *Escalamiento de las técnicas de producción y manejo de las principales especies de eucalipto plantadas en Chile*, y en él se incluyen las líneas de investigación en eucalipto que INFOR considera indispensables de abordar, así como también las actividades necesarias para mantener y medir la red de ensayos actualmente existente y que son la base de las distintas funciones que conforman el modelo de simulación. El resumen del proyecto se presenta en el Anexo N°8.

### ***Actividad 13 : Asistencia Conferencia IUFRO.***

Durante los días 3, 4 y 5 de septiembre de 1997, investigadores del proyecto asistieron a una Conferencia sobre modelación del crecimiento desarrollada en la ciudad de Valdivia, X Región, organizada por IUFRO (Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal) y la Universidad Austral.

El tema de la Conferencia fue *Modelling Growth of Fast-Grown Tree Species*, y tuvo por objetivo reunir a especialistas nacionales y extranjeros en temas de la modelación y estudios del crecimiento en especies forestales de rápido crecimiento.

Durante este encuentro el equipo del proyecto intercambio opiniones acerca de las líneas de investigación desarrolladas y los resultados obtenidos, tanto a nivel nacional y, especialmente, con expertos en el manejo del eucalipto de Portugal y Australia, concluyendo que según las experiencias propias y externas, la línea de trabajo seguida por el proyecto es la más aceptada y adecuada.

**4.5 Objetivo Desarrollar un modelo para la utilización de fustes, basado en funciones de ahusamiento generales y locales, para las especificaciones técnicas de los productos demandados por el mercado.**

**Actividad 1: Estudio para la determinación de funciones de conicidad (ahusamiento) en rodales adultos de *Eucalyptus globulus*, requeridas para su utilización en un futuro simulador de trozado para eucalipto.**

Para la cuantificación de los productos forestales que el bosque puede proporcionar se recurre, principalmente, a la determinación del volumen de los árboles o parte de él, siendo este parámetro una de las informaciones importantes en la descripción de las masas forestales.

Existen numerosas formas para la determinación del volumen de un árbol, pero no es así para obtener el volumen de secciones del fuste. Para solucionar este problema se han desarrollado modelos matemáticos que describen el perfil del fuste de un árbol.

Estos modelos matemáticos se denominan *modelos de ahusamiento* y consisten, básicamente, en relaciones funcionales que usan como variable dependiente el diámetro del fuste a cualquier altura desde el nivel del suelo, y como variables independientes, variables de estado del árbol que son fáciles de medir, como lo son el DAP y la altura total.

Estas son funciones que representan la variación diamétrica a lo largo del fuste en relación a una o más variables que caracterizan la forma de los mismos.

Para cuantificar la forma del fuste son necesarias varias mediciones de diámetros y alturas a lo largo de él, requiriéndose, además, conocer los parámetros del árbol ya que la forma del fuste varía de árbol en árbol.

Los *modelos de ahusamiento* permiten estimar diámetros en cualquier punto o sección del fuste, proporcionando información acerca de la disponibilidad y características de la materia prima, permitiendo desagregar las existencias volumétricas según las dimensiones de las trozas bajo cualquier especificación, ya sea sobre su longitud o diámetros límites. Son importantes, además, en el modelamiento de la forma del árbol en los procesos de simulación del trozado

Algunos estudios han destacado las ventajas de utilizar las *funciones o modelos de ahusamiento* para la determinación del volumen. Para ello asimilan la forma del fuste a un sólido de revolución, o bien con relaciones funcionales que permiten estimar el diámetro del fuste a una altura determinada del árbol.

La función de ahusamiento utilizada permitiría estimar volúmenes totales de los árboles, el volumen de trozas entre dos puntos cualesquiera a lo largo del fuste y el diámetro de cualquier sección transversal del fuste.

En general, un buen modelo debería cumplir con ser suficientemente flexible, compatible, buen estimador, simple en su expresión analítica, de fácil aplicación y/o costo y ser lógico en su formulación.

En el país existen algunos modelos de ahusamiento desarrollados para *Pinus radiata* en diferentes regiones, y para renovales de roble y raulí en donde son probados una serie de modelos. Sin embargo, la información sobre la utilización de estas funciones en especies del género *Eucalyptus* no existe o es muy limitada.

Debido a la falta de antecedentes en este sentido, el proyecto ha reunido una base de datos que permita determinar modelos de ahusamiento, utilizando la información disponible y métodos y técnicas estadísticas.

El objetivo de este trabajo es la construcción de un modelo de ahusamiento para eucalipto, presentando un modelo preliminar basado en la información actualmente disponible.

Con la información utilizada para la construcción de funciones de volumen, se trabajó en la determinación de funciones de ahusamiento para rodales adultos de *E. globulus* ubicados en la V, VI y X Región. En este estudio se ajustaron modelos polinomiales y de árbol individual o parametrizado, aplicados a cada área geográfica por separado y a la información a nivel agregada (modelo general).

Los resultados obtenidos sugieren que un modelo a nivel local de tipo polinomial sería recomendable para ser utilizado en *E. globulus*.

Los modelos obtenidos en cada área son confiables en sus estimaciones, mientras que los resultados obtenidos de ajustar un único modelo polinomial a toda la información no han demostrado ser completamente eficientes hasta el momento. El análisis con un modelo general de tipo parametrizado o de árbol individual tampoco demostró ser más eficiente.

La dispersión de la información recolectada puede ser observada a través del perfil de los árboles medidos. Estos perfiles se presentan en el Gráfico N°23.

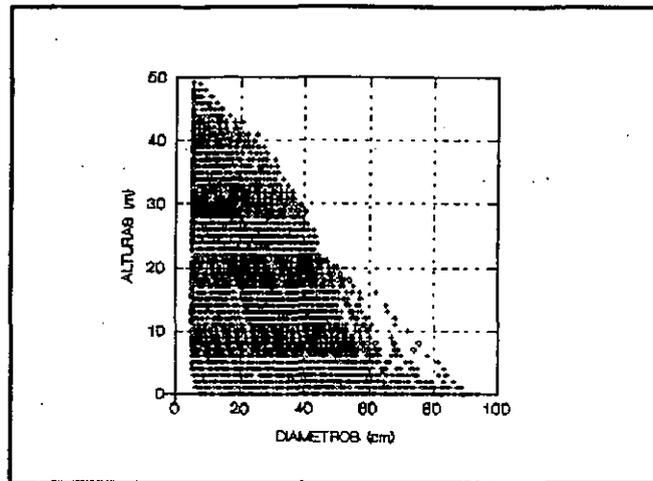


Gráfico N°23. Relación Diámetros/ Alturas relativas árboles adultos *E. globulus*.

Si los datos del gráfico anterior son ponderados, es decir, cada diámetro y altura son relacionados con el DAP y altura total del árbol, es posible apreciar una forma más armonizada del perfil de los árboles adultos de eucalipto. Esta situación se presenta en el Gráfico N°24.

En una primera etapa se ajustaron *modelos polinómiales* generales a los datos obtenidos, repitiéndose el proceso separando la información según área geográfica. El ajuste se realizó utilizando el método de los mínimos cuadrados y por la combinación de variables empleadas en los modelos considerados, usando la técnica de regresión paso a paso.

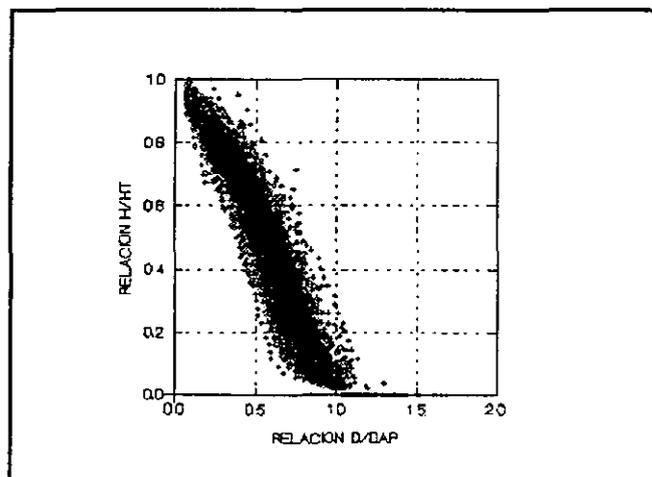


Gráfico N°24. Perfil armonizado árboles de eucalipto.

Estos modelos utilizan, generalmente, como variables independientes alguna de las siguientes expresiones:

- i )  $h/H$
- ii )  $(H-h)/H$
- iii)  $(H-h)/(H-1,3)$

donde:

H = Altura total en metros.

h = Altura de la observación en metros.

Las variables dependientes correspondientes a estos mismos modelos son del tipo:

- i )  $d/DAP$
- ii )  $d^2/DAP^2$
- iii)  $d$

donde:

DAP = Diámetro del fuste en cm a 1,3 metros de altura.

d = Diámetro del fuste en cm a la altura h.

Adicionalmente, en el proceso de ajuste de estos modelos se utilizan variables transformadas, correspondientes a expresiones generales que se relacionan con las diferentes formas que pueden adquirir las variables originales antes mencionadas.

La estructura de un modelo polinomial, en general, puede presentar la siguiente forma:

$$Y^2 = a \cdot \text{COS}(F1) + b \cdot F1 + c \cdot F2 + d \cdot F3 + e \cdot h + f \cdot H$$

donde:

- Y =  $d/DAP$ .
- d = Diámetro en cm a la altura de medición h.
- DAP = Diámetro a la altura del pecho en cm.
- H = Altura total del árbol en metros.
- F3 =  $DAP \cdot (H^2 - h^2) \cdot (h - 1,3) / H^2$ .
- h = Altura en metros de la medición relativa sobre el fuste.
- F1 =  $(H - h) / (H - 1,30)$ .
- F2 =  $((H - h) / (H - 1,30))^{10}$ .
- COS = Coseno de la función.
- a, b, c, d, e, f = Coeficientes de las funciones.

La aplicación de los diferentes modelos sobre los datos originales del estudio, comparando los diámetros reales medidos con los correspondientes estimados, permite evaluar las propiedades de los modelos.

En la selección de los modelos de ahusamiento se utilizaron como indicadores de la bondad de ajuste, el error cuadrático medio porcentual (ECM(%)), como indicador de la exactitud de la función; sesgo probable en porcentaje (DIFA(%)), como indicador de la magnitud de los sesgos; el estimador de Durbin-Watson (correlación serial de los residuos del modelo), el coeficiente de correlación y la distribución de los residuos.

Los estudios en este tema mencionan que la forma del fuste es representada más adecuadamente por funciones polinomiales. La literatura señala, además, que los modelos simples en empleo y construcción evidencian buenas propiedades estimadoras.

Un segundo tipo de estudio se realizó ajustando un *modelo de árbol individual o parametrizado*. Este análisis alternativo se basa en que cada árbol presenta una forma de fuste distinta por lo que con las observaciones realizadas por árbol es posible determinar funciones de ahusamiento para árboles individuales, ajustando a cada árbol un mismo modelo previamente seleccionado, obteniendo coeficientes diferentes para cada individuo. A continuación se obtienen los estimadores de estos coeficientes, en función de variables que pueden ser distintas a las utilizadas en el modelo seleccionado.

Según la bibliografía, en algunos casos estos modelos parametrizados presentan mejores estimaciones y comportamiento que las funciones de tipo polinomial, por lo que es de interés su análisis y aplicación para este estudio.

En este análisis se ajusta un único modelo de ahusamiento a cada árbol, generando un archivo de coeficientes de regresión y variables descriptoras del árbol.

Posteriormente, se ajusta una función que permita estimar los coeficientes de la función de ahusamiento para cualquier árbol en base a las variables descriptivas del mismo individuo (DAP, altura, edad, etc.).

El primer paso de este análisis es determinar cuál es el coeficiente que tiene la mayor correlación con las variables del árbol. Posteriormente, se determina aquél de los restantes estimadores que mejor se relaciona con las mismas variables del árbol y el coeficiente identificado anteriormente. El proceso se repite agregando en cada oportunidad tantos coeficientes como tenga el modelo.

Con las relaciones entre los coeficientes y los parámetros del árbol se obtienen las funciones estimadoras de cada coeficiente del modelo, quedando el modelo de árbol individual formado por tantas funciones estimadoras como coeficientes posea.

En la muestra del proyecto se probaron una serie de funciones sugeridas por la literatura, especialmente aquellos modelos polinomiales sin término constante y que tienen como variable dependiente la expresión:

$$d/DAP$$

donde:

$d$  = Diámetro en cm a la altura de medición  $h$ .

$DAP$  = Diámetro en cm a la altura del pecho.

En general, el término independiente que entrega una mayor consistencia a lo largo del fuste, y en especial en la primera sección de él, corresponde a:

$$(H - h)/(H - 1,3)$$

donde:

$H$  = Altura total del árbol en metros.

$h$  = Altura en metros de la medición relativa sobre el fuste.

La expresión matemática general de un modelo parametrizado o de árbol individual corresponde a:

$$[d/DAP] = A \cdot X + B \cdot X^2 + C \cdot X^3 + \dots + Z \cdot X^N$$

donde:

$X$  =  $(H-h)/(H-1,3)$

$d$  = Diámetro en cm a la altura de medición  $h$ .

$DAP$  = Diámetro a la altura del pecho en cm.

$H$  = Altura total del árbol en metros.

$h$  = Altura en metros de la medición relativa sobre el fuste.

$A, B, C, Z$  = Constantes.

Con los resultados de los modelos probados y considerando que la simplicidad en su uso como elemento de estimador es importante para los procesos de cubicación en un inventario forestal, se seleccionó un modelo de tipo polinomial, cuya estructura corresponde a:

$$d/DAP = 1,269 - 0,003 \cdot DAP + 0,003 \cdot H + 0,003 \cdot h + 0,648 \cdot (1/DAP) - 0,079 \cdot \text{Log}H - 0,996 \cdot (h/H)$$

donde:

d = Diámetro en cm medido a la altura relativa h.

DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

H = Altura total del árbol (m).

h = Altura de medición del diámetro d (m).

Log = Logaritmo en base 10.

En el Cuadro N°11 se presentan los estimadores de esta función.

Cuadro N°11. Estimadores modelo ahusamiento para eucalipto adulto.

$r^2 = 0,962$ $ECM = 0,073$
--------------------------------

Un ejemplo de los resultados obtenidos se presentan en el Gráfico N°25, en la cual se grafican los diámetros reales y los estimados por el modelo polinomial aplicado al total de los datos.

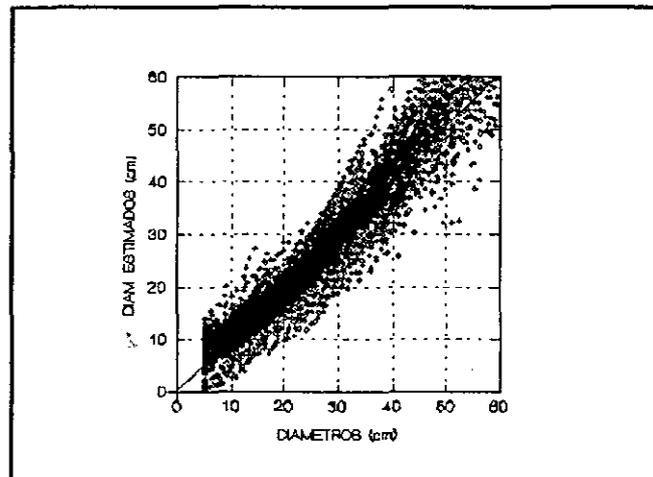


Gráfico N°25. Diámetros estimados según modelo polinomial.

Al igual que en el caso de las funciones de volumen, los resultados de este estudio constituirán una publicación del proyecto, los que junto con los de la determinación de funciones de volumen permitirá, además, la realización de un estudio de la forma del árbol para *E. globulus*.

Este mismo estudio se realizó para rodales jóvenes de eucalipto, no mayores a 20 cm de DAP, con información proveniente de parcelas temporales instaladas en diversos rodales de eucalipto entre la VIII y X Región.

Los resultados obtenidos indican que el modelo sería confiable para su uso como función de ahusamiento preliminar, requiriéndose de un mayor número de datos para lograr un mejoramiento del modelo y de su ajuste.

Si se considera que las actuales edades de rotación de las plantaciones de eucalipto destinadas a la producción de pulpa están entre los 10 a 12 años, y que, producto del mejoramiento genético a que están siendo sometidas estas especies este rango disminuirá a edades de entre 8 y 10 años, el modelo de ahusamiento basado en estos datos sería altamente confiable.

El modelo de ahusamiento que entregó una mejor correlación con los datos originales correspondió a uno del tipo polinomial, cuya formulación es:

$$Y^2 = -0,037*(H^2-h^2)*(h-1,3)/H^2 + 0,028*h + 0,886*(H-h)/(H-1,30) \\ -0,194*\text{COS}((H-h)/(H-1,30)) - 0,021*DAP*(h/H) + 0,009*H \\ + 0,126*((H_m-h_m)/(H_m-130))^{10}$$

donde:

- Y =  $d/DAP$ .  
 d = Diámetro en cm a la altura de medición h.  
 DAP = Diámetro en cm a la altura del pecho.  
 H = Altura total del árbol en metros.  
 h = Altura en metros de la medición relativa sobre el fuste.  
 H<sub>m</sub> = Altura total del árbol en milímetros.  
 h<sub>m</sub> = Altura de la medición relativa sobre el fuste en milímetros.

Dada una medición de la altura relativa (h), y conociendo la altura total (H) y el DAP del árbol, es posible estimar el diámetro (d) a la altura relativa requerida a través de la expresión:

$$d = \sqrt{Y} * DAP$$

La construcción de un modelo de árbol individual no implicó la obtención de resultados superiores al modelo polinomial, por lo que sería aceptable y razonable utilizar el modelo antes descrito para la estimación de diámetros provenientes de rodales jóvenes de eucalipto.

Este resultado difiere de otros estudios del mismo tipo, en los cuales generalmente el modelo de tipo parametrizado presentaba un mejor ajuste, debiéndose posiblemente al tipo de información utilizada en su construcción. Este factor deberá ser revisado al momento de contar con una mayor cantidad de información para este tipo de análisis.

La certidumbre de las proyecciones puede basarse en la capacidad que presenta la información de ajustarse adecuadamente a varios modelos seleccionados, de los cuales se eligió uno por la comparación y relación entre los valores de los indicadores del ajuste.

Al realizar ajuste según especie de eucalipto los resultados del estudio parecen indicar que sería aconsejable utilizar el modelo de ahusamiento de tipo polinomial general para todas las especies de eucalipto.

El poder construir un modelo de ahusamiento de mayor precisión dependerá de aumentar la base muestral, tanto en edades como en especies, en una cantidad suficiente y con la metodología adecuada para este objetivo.

## ***Actividad 2 : Modelo optimizador en la utilización de fustes (Trozador), programación y validación.***

Durante el proyecto se trabajó en el diseño e implementación de un simulador de trozado para la especie y bosque de interés, que sea susceptible de seleccionar la función de ahusamiento a utilizar, e ingresar un esquema de trozado de acuerdo a las necesidades del usuario.

A continuación una sintetizada descripción del *Trozador experimental de eucalipto*, desarrollado en base a los resultados arrojados por el proyecto y a experiencias anteriores llevadas a cabo por INFOR en materia de trozadores. Esta descripción abarca tanto aspectos de uso (operativos), como de los componentes que hacen posible su funcionamiento (aspectos biométricos).

## I. Componentes biométricos del Trozador.

El trozador se basa en tres componentes de biometría principales: una función de ahusamiento, un modelo de distribución diamétrica y una función altura-dap dependiente de variables de rodal.

### a) Función de ahusamiento.

La función de ahusamiento permite representar en base a variables del árbol como el Dap y altura total, la variación diamétrica a lo largo del fuste. En otras palabras hace posible encontrar la altura sobre el fuste, a la que se encuentra un diámetro determinado, o el diámetro existente a cierta altura sobre el fuste del árbol. Siendo esta función la base fundamental para la simulación del trozado de un árbol.

En la literatura existen diversos modelos matemáticos propuestos para este fin. Los ajustes realizados en base a los datos existentes, muestran que los modelos polinómicos entregan buenos resultados, como es el caso del siguiente modelo:

$$d/DAP = A X + B X^2 + C X^{10} + D X^{34} \quad (1)$$

donde:

X	= (H-h)/(H-1,3)
d	= Diámetro en cm a la altura de medición h.
DAP	= Diámetro a la altura del pecho en cm.
H	= Altura total del árbol en metros.
h	= Altura en metros de la medición relativa sobre el fuste.
A, B, C, D	= Parámetros.

### b) Distribución diamétrica (Función de probabilidad Weibull).

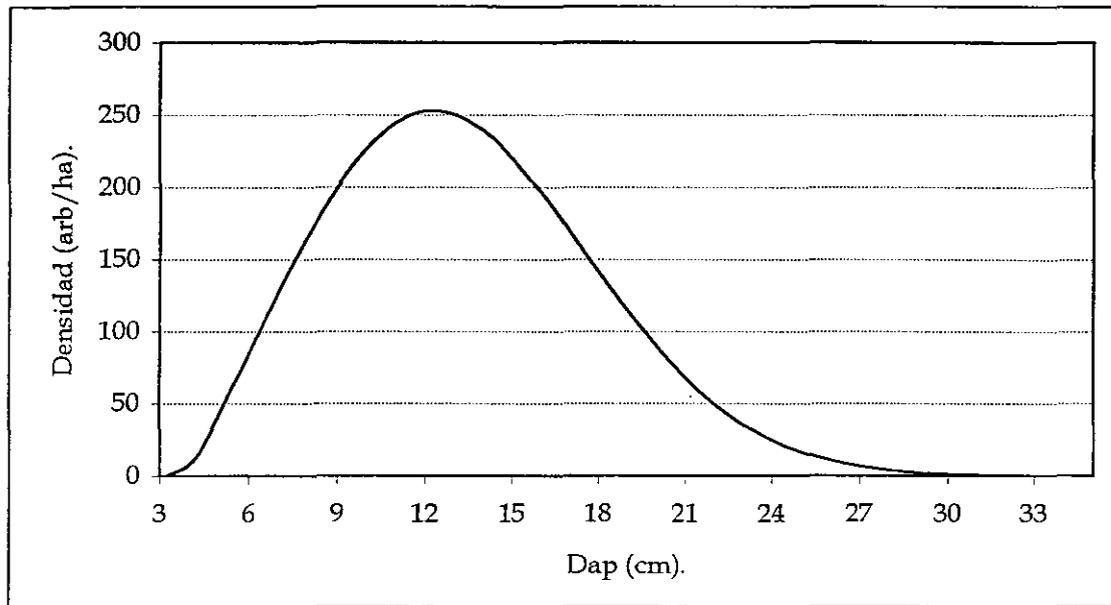
Con el uso de la función de distribución de probabilidad Weibull (2) se realiza la generación de una tabla de rodal (número de árboles por clase diamétrica), a partir de las variables agregadas: densidad (arb/ha) y área basal (m<sup>2</sup>/ha), Gráfico N°26. Mediante la tabla de rodal es posible expandir a la hectárea, los productos que deriven del trozado de un árbol medio en una clase diamétrica cualquiera.

$$F(x) = 1 - \text{EXP}(-a(x-c)^b), \quad c \leq x < \infty \quad (2)$$

donde:

$F(x)$  = Probabilidad acumulada entre  $c$  y  $x$ .  
 $x$  = Clase diamétrica.  
 $c$  = Límite inferior para  $x$ .  
 $a, b$  = Parámetros a estimar.

La metodología empleada para el ajuste de los parámetros de (2), fue tomada de un artículo de García (1981) (*Simplified method of moments estimation for the Weibull distribution*. New Zealand Journal of Forestry Science 11(3):304-6.).



**Gráfico N°26.** Gráfica de la función Weibull para un rodal cualquiera.

### c) Función Altura - Dap dependiente de rodal.

La función Altura - Dap permite la estimación de la altura total media para cada clase diamétrica de un rodal determinado, y evidentemente depende de las variables de rodal. Mediante la altura del árbol medio de la clase, estimada por esta función, es posible calcular los productos que se obtendrán de dicho árbol bajo un esquema de trozado determinado.

El modelo que mejores resultados arrojó empleando la información existente fue (3), presentando ajustes ( $R^2$  corregido no lineal) de 0,88.

$$H_{ik} = B_i^{C1} N_i^{C2} \text{EXP}(C3 - C4 \text{DAP}_{ik}^{C5}) \quad (3)$$

donde:

$H_{ik}$	= Altura total media de clase diamétrica k, rodal i.
$B_i$	= Área basal ( $\text{m}^2 / \text{ha}$ ), rodal i.
$N_i$	= Densidad ( $\text{arb}/\text{ha}$ ), rodal i.
$\text{DAP}_{ik}$	= Dap (cm) clase diamétrica k, rodal i.
$C1, C2, C3, C4, C5$	= Parámetros estimados.

## II. Operación del trozador.

El trozador fue implementado como una Macro (o programa) para Microsoft Excel 5.0<sup>®</sup>, escrita en lenguaje *Visual BASIC*<sup>®</sup> para aplicaciones en Microsoft Excel 5.0. Por lo tanto, debe ser ejecutado como una Macro dentro de Microsoft Excel 5.0 o versión superior.

Luego de abrir el libro o archivo **TROZADOR.XLS** que contiene la Macro, y que debe estar ubicado en el subdirectorio `C:\msoffice\excel`, se necesita oprimir el botón "Iniciar trozador" ubicado en la hoja "Inicio" de dicho libro. Realizado lo anterior, la Macro se ejecutará dando paso a una pantalla de presentación (Figura N°5). En esta pantalla se ofrecen las siguientes 4 alternativas:

- 1- Trozar un árbol.
- 2- Trozar un rodal.
- 3- Esquemas de trozado.
- 4- Opciones.

Estas opciones son descritas a continuación.

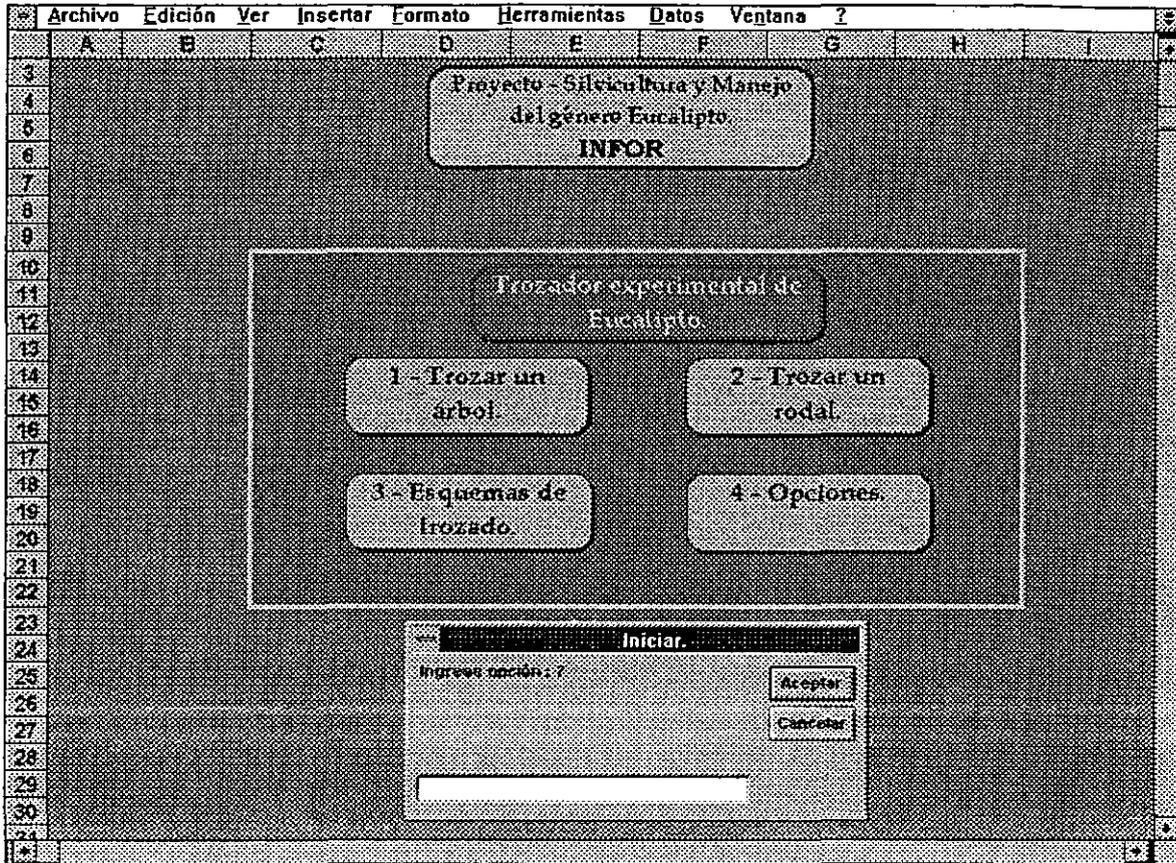


Figura N°5. Pantalla de presentación del Troizador.

a) Trozado de árboles.

La alternativa 1 de la pantalla de presentación conduce al trozado de árboles individuales. Para esto se presenta una segunda pantalla (Figura N°6) que muestra dos listados. El listado de la izquierda corresponde al grupo de árboles a trozar. Cada árbol se encuentra identificado por un número correlativo, altura total (m), dap (cm), diámetro límite a trozar y esquema de trozado a usar (punto c). El diámetro límite se refiere al diámetro mínimo de utilización.

Al comienzo se ofrece la posibilidad de borrar el listado actual de árboles, y de agregar nuevos árboles a la lista actual o crear una nueva lista. Todo por medio de un cuadro de ingreso interactivo con el usuario. Al final de este procedimiento se da la opción de comenzar el trozado de cada árbol, cuyos resultados quedarán grabados en un archivo de resultados.

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?									
	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Arboles				Rodales				
2	Altura Total	Dap	Diámetro	Esq	Area Basal	Densidad	Diámetro	Esq	
3	(m)	(cm)	Mayor (cm)	Menor	(m <sup>2</sup> /ha)	(nárb/ha)	Mayor (cm)	Menor	
4									
5	29.7	34.0	10.0	2	1	34.0	1300	10.0	2
6	24.0	27.0	5.0	1	2	24.0	1500	5.0	1
7	26.0	23.0	5.0	3	3	25.0	2000	5.0	1
8	27.0	29.0	10.0	1	4				
9					5				
10					6				
11	Trozar rodales								
12	Rodal: 4. Area basal (m <sup>2</sup> /ha): 7								
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									

Figura N°6. Pantalla de ingreso para árboles individuales y rodales.

### Archivo de resultados.

En el archivo de nombre RESARB.XLS son guardados los resultados del trozado de árboles. Este archivo debe estar previamente creado (aunque esté vacío) en C:\msoffice\excel.

Los resultados contenidos dentro de RESARB.XLS se describen a continuación.

- ÁRBOL : número correlativo del árbol en la lista.
- PRODUCTO : número identificador del producto en un esquema determinado.
- LARGO : largo del producto (m).
- DIAM. MAY.: diámetro mayor (cm) del producto.
- DIAM. MEN.: diámetro menor (cm) del producto.
- ALT. FUSTE : altura acumulada sobre el fuste (m) desde la base del árbol.

Una vez terminado el trozado, y por lo tanto, grabados los resultados en el archivo RESARB.XLS, se aconseja copiar los resultados contenidos en este archivo, a otro archivo de nombre a elección por el usuario. Lo anterior debido a que RESARB.XLS será ocupado por el trozador para el almacenaje de resultados arrojados por los sucesivos trozados a ejecutar, eliminándose la anterior información contenida en el archivo.

#### **b) Trozado de rodales.**

La alternativa 2 de la pantalla de presentación conduce al trozado de rodales. Para esto también se presenta la pantalla del punto a) (Figura N°6) que muestra dos listados. El listado de la derecha corresponde al grupo de rodales a trozar. Cada rodal se encuentra identificado por un número correlativo, área basal ( $m^2/ha$ ), densidad (arb/ha), diámetro límite a trozar y esquema de trozado a usar.

Al comienzo se ofrece la posibilidad de borrar el listado actual de rodales, y de agregar nuevos rodales a la lista actual o crear una nueva lista. Todo por medio de un cuadro de ingreso interactivo con el usuario. Al final de este procedimiento se da la opción de comenzar el trozado de cada rodal, cuyos resultados quedarán grabados en un archivo de resultados.

#### **Archivo de resultados.**

En el archivo de nombre RESROD.XLS son guardados los resultados del trozado de rodales. Este archivo debe estar previamente creado (aunque esté vacío) en C:\msoffice\excel.

Los resultados contenidos dentro de RESROD.XLS se describen a continuación.

RODAL	: número correlativo del rodal.
CLAS. DIAM.	: dap medio de la clase diamétrica (cm).
NARB/HA	: arb/ha de la clase diamétrica.
ALT.CLAS.	: altura promedio de la clase diamétrica (m).
PRODUCTO-VOLUMEN	: listado con el número identificador del producto, seguido del volumen ( $m^3/ha$ ) total de este en la clase diamétrica correspondiente.

Una vez terminado el trozado, y por lo tanto, grabados los resultados en el archivo RESROD.XLS, se aconseja copiar los resultados contenidos en este archivo, a otro archivo de nombre a elección por el usuario. Lo anterior debido a que RESROD.XLS será ocupado por el trozador para el almacenaje de resultados arrojados por los sucesivos trozados a ejecutar, eliminándose la anterior información contenida en el archivo.

### c) Esquemas de trozado.

La alternativa 3 de la pantalla de presentación conduce a la definición de los esquemas de trozado, empleados tanto para árboles como rodales. Para esto se presenta una tercera pantalla (Figura N°7) que muestra un listado conteniendo los diferentes esquemas de trozado a emplear. El ingreso de los esquemas se realiza mediante un cuadro de entrada interactivo con el usuario. Al comienzo se ofrece la posibilidad de borrar el listado existente de esquemas, y de agregar nuevos esquemas a la lista actual o crear una nueva lista.

Cada esquema esta definido por un número correlativo ascendente, un producto (identificado por otro número correlativo ascendente dentro del esquema), el largo del producto (m) y el diámetro mínimo aceptado para el producto.

	Archivo	Edición	Ver	Insertar	Formato	Herramientas	Datos	Ventana	?
	B	C	D	E	F	G	H		
1	Esquema	Número	Largo	Diám. mín.					
2	número	producto	(m)	(cm)					
3	1	1	4,00	35,0	Esquema 2				
4	1	2	3,50	30,0	Producto 1 - DIAM. MENOR (cm) :				
5	1	3	3,00	25,0	<input type="text"/>				
6	1	4	3,00	20,0	<input type="text"/>				
7	1	5	2,44	15,0	<input type="text"/>				
8	1	6	2,44	10,0	<input type="text"/>				
9	1	7	1,60	5,0	<input type="text"/>				
10	2	1	5,00	40,0	<input type="text"/>				
11	2	2	4,50	45,0	<input type="text"/>				
12	2	3	4,00	30,0	<input type="text"/>				
13	2	4	3,50	25,0	<input type="text"/>				
14	2	5	3,00	20,0	<input type="text"/>				
15	2	6	2,44	15,0	<input type="text"/>				
16	2	7	1,60	5,0	<input type="text"/>				
17					<input type="text"/>				
18					<input type="text"/>				
19					<input type="text"/>				
20					<input type="text"/>				
21					<input type="text"/>				
22					<input type="text"/>				
23					<input type="text"/>				
24					<input type="text"/>				

Figura N°7. Pantalla de ingreso para esquemas de trozado.

Dado un esquema, la tarea a realizar por el trozador será extraer la mayor cantidad del producto 1, recorriendo el fuste desde el corte del tocón hacia la copa del árbol, hasta que el requerimiento del diámetro mínimo del producto no pueda ser satisfecho. De esta manera se pasa al producto 2, hasta que nuevamente su extracción se vea impedida por no cumplirse las dimensiones mínimas exigidas. Este procedimiento se desarrolla sucesivamente llegando al producto  $n$  (último número correlativo de la lista ascendente de productos, dentro de un esquema de trozado).

El proceso descrito es aplicado para cada árbol individual de una lista de árboles, o para cada árbol-clase de una tabla de rodal en una lista de rodales. Todos los resultados provenientes de este proceso son guardados en los respectivos archivos de resultados.

#### d) Opciones.

La alternativa 4 de la pantalla de presentación, activa un cuadro de entrada que permite la definición (ingreso vía usuario) de los puntos descritos a continuación.

- Altura de tocón (m).
- Ancho de corte estimado de la motosierra (m).
- Tolerancia para la búsqueda del diámetro límite sobre el fuste (cm).
- Tolerancia máxima para la aceptación de un producto, que este bajo el diámetro mínimo aceptado (cm).

### III. Esquemas de trozado

El modelo desarrollado troza el árbol según un esquema determinado por el usuario, y que, a modo de ejemplo, puede tener el formato que se presenta en el Cuadro N°12.

Cuadro N°12. Ejemplo de Esquema de Trozado

Producto	Diámetro menor (cm)	Largo (m)
1	30	4,1
2	25	4,1
3	20	4,1
4	10	2,44
5	5	1,6

Se pretende realizar el trozado del árbol de acuerdo al orden o prioridad que el usuario ingrese en el esquema de corte. El esquema sólo incluye largos y el diámetro menor del producto a extraer. No presenta ninguna restricción adicional referida a diámetros menores o mayores, ó, número de trozos a extraer por árbol.

Para complementar este módulo se diseñó una rutina que independiente de la función de ahusamiento seleccionada determina el diámetro a una altura dada, siendo este diámetro el condicionante para el cambio en los esquemas de trozado.

Los resultados del trozado pueden incluir :

- Número de trozas por producto.
- Diámetros mayor y menor de cada troza (cm), junto con el largo (m).
- Volumen de cada troza en m<sup>3</sup> sin corteza (cubicación según Smalian).

Al trozador es posible agregarle dos restricciones (tolerancias), en diámetro y largo, definidas por el usuario. Es decir, al ingresar el diámetro menor del trozo y/o su largo, se ingresa también la tolerancia en centímetros o metros, según corresponda.

Esto permite, por ejemplo, obtener trozos de 2,44 m con diámetro menor medio de 12 cm, y no de otros diámetros menores, con valores mayores o menores que el especificado considerando la tolerancia.

El módulo optimizador basado en precios y costos unitarios, oferta y demanda, permite al simulador dar una solución óptima estricta del trozado del rodal, siendo de utilidad, además, en el estudio comparativo de rodales o macrorodales.

#### IV. Observaciones finales.

En su calidad de **trozador experimental**, la herramienta descrita está sujeta a nuevas mejoras. Tanto en sus componentes biométricos como en su potencial analítico, capacidad de entregar soluciones integrales y software utilizado.

Por ejemplo se hace necesario el desarrollo y mejoramiento de las funciones de ahusamiento, incorporando una base de información más amplia a la actualmente existente. En lo posible cubriendo rangos de edades superiores a 10 años, que actualmente adolecen de datos suficientes.

Otro punto importante es la incorporación al sistema de variables económicas, que posibiliten una completa y sucesiva optimización de los recursos. Es decir, que esta herramienta esté constantemente evolucionando como optimizador de trozado.

También son importantes los avances que se puedan incorporar en materia de software utilizado para su desarrollo. Posibilitando esto el uso de las nuevas tecnologías en lenguajes de programación.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El rango de validez del modelo se encuentra entre los 3 y 14 años de edad, debido a la escasez de información para edades menores y mayores respectivamente. Esto pone de manifiesto la necesidad de contar con nuevas mediciones en los rangos de edades donde se presentan falencias, ampliando al mismo tiempo las áreas geográficas consideradas en el estudio hacia aquellas con insuficiente números de unidades experimentales o donde ellas no existen.

A continuación se presentan las funciones que componen el modelo de crecimiento (Crecimiento en altura, mortalidad natural, rendimiento y crecimiento para área basal, y predicción de volumen): Además se describe la información utilizada para el desarrollo de dichas funciones.

Los resultados entregados por el proyecto confirman que rodales de mayor densidad presentan menores incrementos en DAP. Esto es concordante con los resultados entregados por otros estudios realizados en eucalipto, al mismo tiempo que las distintas densidades no afectan el desarrollo en altura, correspondiendo los valores observados a las condiciones de sitio existente.

Al mismo tiempo la diversidad de crecimientos encontrados en las parcelas permanentes, con diferencias de índice de sitios en rodales ubicados en condiciones edafoclimáticas similares, reflejan las particulares características de crecimiento del eucalipto. Esto ha motivado que distintos investigadores hagan del estudio de estas especies un trabajo a nivel de árbol individual, y no a nivel de rodal como es la metodología usualmente empleada.

Prácticamente toda la información utilizada en este estudio se concentra entre los 3 y 11 años de edad, en base a la información proporcionada por una red de alrededor de 200 parcelas permanentes, lo que limita el rango de validez de los modelos obtenidos. Sin embargo, aún cuando se tengan en cuenta estas limitaciones, los resultados obtenidos constituyen una primera herramienta para el manejo de las plantaciones de eucalipto, lo que permite la toma de decisiones en relación con el recurso.

Por lo anterior, se hace importante y necesaria la remediación continua de las parcelas permanentes. Esto, además, será útil en la evaluación y potencial desarrollo posterior de las nuevas versiones del modelo de simulación. Sin olvidar la importancia que tiene el hecho de mantener activa y actualizada la actual red de parcelas permanentes, en la cual han sido invertidos tantos recursos y tiempo.

Esto permitiría abarcar y reforzar el rango de edades entre 8 y 15 años, que actualmente presenta una evidente escasez de observaciones, y reduce la validez de las funciones desarrolladas en dicho rango. También se lograría una evaluación más completa de las ecuaciones de crecimiento en altura, y además, la prueba de técnicas más complejas e intensivas de modelado.

Independiente de las falencias o limitantes en la información de que se disponga para la producción de un modelo de crecimiento, las proyecciones que se realicen con este deben ser tomadas con mesura y bastante criterio. Esto cobra mucha importancia en especies como Eucalipto, que ha demostrado ser muy sensible al efecto *micrositio*, produciéndose diferencias grandes de rendimiento en puntos separados por pequeñas distancias. Esto también dificulta bastante el estudio para diferenciar grandes zonas de crecimiento, obligando a disponer para esta finalidad de un número mayor de parcelas permanentes, especialmente en aquellas zonas geográficas donde actualmente existe escasez. Frente a todo esto un apoyo fundamental lo constituye la validación y el control en terreno de las estimaciones realizadas con este tipo de herramientas.

El objetivo central del estudio fue cuantificar y proyectar el crecimiento de rodales de *Eucalyptus* dadas condiciones iniciales como densidad y sitio. La productividad del sitio es determinada por la altura dominante de los 100 árboles de mayor diámetro del rodal, que además se considera como una interpretación del tiempo biológico modificado por los tratamientos silvícolas realizados antes de los 4 años (control de malezas con aplicación de herbicidas y fertilización).

El conjunto de modelos y funciones obtenidas logran reflejar los rendimientos volumétricos observados, variando estos entre 5 m<sup>3</sup>/ha/año a más de 40 m<sup>3</sup>/ha/año a los 10 años de edad. Sin embargo, las funciones del modelo deben ser continuamente reajustadas en la medida que se obtengan nuevas mediciones, debido a la sensibilidad de las especies estudiadas a las variaciones climáticas, micrositio y actividades de mejoramiento del suelo.

Aún cuando los datos utilizados en la construcción de los modelos de ahusamiento provienen de rodales jóvenes de eucalipto y adultos en forma separada, es importante contar con una herramienta que permita estimar con cierta precisión los diferentes diámetros a lo largo del fuste del árbol.

Los resultados obtenidos indican que los modelos serían confiables para su uso como funciones de ahusamiento preliminares, requiriéndose de un mayor número de datos para lograr un mejoramiento de los modelos y de sus ajustes, al mismo tiempo que se debe analizar el uso de un sólo modelo para todo tipo de edades en eucalipto.

Si se considera que las actuales edades de rotación de las plantaciones de eucalipto destinadas a la producción de pulpa están entre los 10 a 12 años, y que, producto del mejoramiento genético a que están siendo sometidas estas especies este rango disminuirá a edades de entre 8 y 10 años, el modelo de ahusamiento basado en estos datos sería altamente confiable.

El modelo de ahusamiento que entregó una mejor correlación con los datos originales correspondientes a rodales juveniles correspondió a uno del tipo polinomial, cuya formulación es:

$$Y^2 = -0,037*(H^2-h^2)*(h-1,3)/H^2 + 0,028*h + 0,886*(H-h)/(H-1,30) - 0,194*\text{COS}((H-h)/(H-1,30)) - 0,021*DAP*(h/H) + 0,009*H + 0,126*((H_m-h_m)/(H_m-130))^{10}$$

mientras que para rodales adultos el modelo seleccionado correspondió a:

$$d/DAP = 1,269 - 0,003*DAP + 0,003*H + 0,003*h + 0,648*(1/DAP) - 0,079*\text{Log}H - 0,996*(h/H)$$

donde:

Y = d/DAP.

d = Diámetro en cm a la altura de medición h.

DAP = Diámetro en cm a la altura del pecho.

H = Altura total del árbol en metros.

h = Altura en metros de la medición relativa sobre el fuste.

H<sub>m</sub> = Altura total del árbol en milímetros.

h<sub>m</sub> = Altura de la medición relativa sobre el fuste en milímetros.

La estructura de ambos modelos es polinomial, lo que indicaría que un modelo común debería tener similares características. Sin embargo, primeros estudios realizados en la búsqueda de un modelo común para rodales juveniles y adultos indican una alta heterogeneidad de información y un complejo nivel de análisis.

La obtención de modelos de tipo polinomial difiere de otros estudios del mismo tipo, en los cuales generalmente el modelo de tipo parametrizado presenta un mejor ajuste, debiéndose posiblemente al tipo de información utilizada en su construcción. Este factor deberá ser revisado al aumentar la cantidad de datos disponibles para futuros análisis.

La certidumbre de las proyecciones esta basada en la capacidad que presenta la información de ajustarse adecuadamente a varios modelos seleccionados, de los cuales se eligieron los más adecuados por la comparación y relación entre los valores de los indicadores del ajuste.

En una primera etapa, utilizar el modelo de ahusamiento de tipo polinomial general para todas las especies de eucalipto de interés puede ser recomendable.

El poder construir un modelo de ahusamiento de mayor precisión dependerá de aumentar la base muestral, tanto en edades como en especies, en una cantidad suficiente y con la metodología adecuada para este objetivo.

El análisis de la información obtenida desde las parcelas permanentes instaladas por INFOR, y las pertenecientes a empresas privadas, permitió la medición del índice de sitio (altura dominante a los 10 años de los 100 árboles más altos por hectárea), agrupándose en seis clases de menor a mayor valor. Al relacionar cada clase con las condiciones de suelo y clima presentes se modelaron las zonas que en cada región presentan el mismo crecimiento potencial (clase de índice de sitio).

Es así como para la especie *Eucalyptus globulus*, se determinó que la mayor superficie se concentraba en la clase 2 (16 m. a menos de 20 m.) con un total de 2.959.947 ha, mientras que para *Eucalyptus nitens*, esta se concentró en la clase 4 (24 m a menos de 28 m) con 453.121 ha. Estas cifras entregan una visión del potencial de crecimiento que alcanzan estas especie.

En el análisis fue significativo el hecho que se encontraran dos o más ensayos de la misma especie con una clase de índice de sitio diferente en condiciones edafoclimáticas bibliográficas iguales. Esto se puede atribuir a variables que no fueron controladas, como las condiciones genéticas del material utilizado, el manejo silvicultural aplicado a los ensayos, especialmente fertilización, y las condiciones de micrositio.

Estas mismas condiciones pueden ser las causantes de que se registraran valores de índice de sitio diferentes en condiciones edafoclimáticas iguales en ensayos instalados por empresas privadas versus los de INFOR en la especie *Eucalyptus globulus*.

Estos antecedentes reafirman las características especiales de crecimiento que presenta el eucalipto, lo que hace más necesario la investigación en temas de productividad y crecimiento, además de estudio integrado con otras áreas dedicadas al cultivo o trabajo con eucalipto, como son la genética forestal y la industrialización de la materia prima (pulpa o madera).

Por ello, y al relacionar el conjunto de resultados obtenidos de crecimiento y rendimiento con otros procesos productivos, se hace necesario contar con un trozador experimental que permita la evaluación de diferentes esquemas de trozado, tanto desde el punto de vista del rendimiento y, al contar con información de precios y costos, económico. Esta tipo de herramientas es de uso común en otros países y en la industria forestal chilena por lo que INFOR debe ampliar el conocimiento y uso de estos instrumentos hacia todos los interesados del sector.

Este trozador es una primera versión y como tal, debe estar sujeto a un proceso continuo de nuevas mejoras, tanto en sus componentes biométricos como en su potencial analítico. Como primer paso, se debe desarrollar y mejorar las funciones de ahusamiento, incorporando una base de información más amplia a la actualmente existente. En lo posible cubriendo rangos de edades superiores a 10 años, que actualmente adolecen de datos suficientes. Otro punto importante es la incorporación al sistema de variables económicas, que posibiliten una completa optimización de los recursos.

Los resultados de crecimiento y rendimiento, y las magnitudes de las variables mensuradas demuestran la variedad de comportamiento que puede presentar el *E. globulus*. Este mismo comportamiento puede esperarse de otras especies de eucalipto que se desarrollan en Chile, tales como *E. nitens*, *E. delegatensis* y *E. camaldulensis*.

Es recomendable, entonces, continuar con la investigación para obtener series de crecimiento con una extensión de tiempo mayor, intentando captar de esta forma el crecimiento real, el efecto de la competencia y la mortalidad en el desarrollo de los rodales de eucalipto. Actualmente INFOR cuenta con el conocimiento y una red de parcelas permanentes que posibilitarían esta investigación.

Sería recomendable, además, incorporar ensayos de espaciamiento y obtener densidades óptimas para cada especie de eucalipto de interés.

Al mismo tiempo, el conocimiento alcanzado en este proyecto debe ser integrado con los obtenidos con otros estudios desarrollados por INFOR (mejoramiento genético), incorporando, además, efectos del manejo (raleos, podas, herbicidas, fertilización) sobre las condiciones de crecimiento del eucalipto, tanto para la generación de productos de corto y largo plazo (pulpa y madera aserrada).

## 6. CONCLUSIONES

- Rodales de eucalipto con una mayor densidad presentan menores incrementos en DAP siendo estadísticamente diferente a rodales con una menor densidad.
- No existen diferencias significativas en la altura media de los árboles según distintas densidades, correspondiendo los valores observados a las condiciones de sitio existente.
- En su calidad de trozador experimental, la herramienta desarrollada por INFOR está sujeta a nuevas mejoras. Tanto en sus componentes biométricos como en su potencial analítico, capacidad de entregar soluciones integrales y software utilizado.
- Como requerimiento de información para la modelación del crecimiento sería deseable tener 3 o más mediciones sucesivas para comprobar su consistencia y detectar errores, además de las variaciones climáticas que requieren abarcar un cierto número de años para obtener resultados representativos.
- Independiente de las falencias o limitantes en la información de que se disponga para la producción de un modelo de crecimiento, las proyecciones que se realicen con este deben ser tomadas con mesura y bastante criterio.
- El modelo utilizado para la determinación de los índices de sitio de los rodales de eucalipto, en base a la altura dominante fue el siguiente:

$$S = 75,3 \{ 1 - [ 1 - (H/75,3)^{0,863} ]^{tc/t} \}^{1/0,863}$$

Donde :

$H$  = Altura dominante (m), de los 100 árboles mayores por hectárea.

$S$  = Índice de Sitio. Para edad clave de 10 años.

$t$  = Edad en años.

$tc$  = Edad índice o clave ; 10 años.

- Al usar la edad clave de 10 años, que está más cercana a las edades de rotación actuales, y calcular  $S$  con el modelo (1) para las parcelas permanentes del proyecto, se obtuvo un rango de Índices de Sitios que abarca mayoritariamente los valores entre 13 a 36 m. En el Cuadro N°13 se aprecia la clasificación de sitio realizada con la información de este proyecto.

Cuadro N°13. Categorías de Índices de Sitio.

Clase de Índice de Sitio (edad clave 10 años)	Rango de altura dominante (m)
I	>32
II	28 - 32
III	24 - 28
IV	20 - 24
V	16 - 20
VI	< 16

- La información de mortalidad natural (mortalidad entre los 3 y 14 años de edad o de post - establecimiento) que se puede obtener con las actuales mediciones de las parcelas permanentes arroja valores promedios cercanos al 1%.
- La influencia del sitio, para los datos en uso, no fue significativa (parámetro B2=0). El modelo que presentó un mejor ajuste correspondió a:

$$N_2 = N_1 (t_2 / t_1)^{B1} \text{ EXP}[(B0 + B2 S) (t_2 - t_1)]$$

Donde :

- $N_2$  = Número de árboles por hectárea en  $t_2$  .  
 $N_1$  = Número de árboles por hectárea en  $t_1$  .  
 $t_2$  = Edad del rodal en periodo 2.  
 $t_1$  = Edad del rodal en periodo 1.  
 $S$  = Índice de Sitio (m) .  
 $B0, B1, B2$  = Parámetros.

- Los mejores resultados en el modelo de crecimiento y rendimiento para área basal se lograron al incorporar la variable Edad en forma de  $1/E$  ( $E$  = Edad en años). La función presentó buenas características en la estimación del rendimiento, además de presentar incrementos asociados compatibles con los observados en las series de crecimiento de las parcelas permanentes. El modelo así definido adopta la siguiente expresión:

$$B = \text{EXP}[B0 + B1 h + B2 h (1/E) + B3 n (1/E)]$$

Donde :

$$n = 100 / \sqrt{N}$$

$$h = 1/(H - 1,3)$$

$N$  = Número de árboles por hectárea.

$H$  = Altura dominante (m), de los 100 árboles mayores por hectárea.

$B$  = Área basal (  $\text{m}^2 / \text{ha}$  ).

$E$  = Edad (años).

$B_0, B_1, B_2, B_3$  = Parámetros.

- En el ajuste del modelo de crecimiento y rendimiento para el volumen, el mejor resultado se obtuvo con el siguiente modelo:

$$V/B = B_0 + B_1 H + B_2 (H/\sqrt{N}) + B_3 (NH/B)$$

donde:

$N$  = Número de árboles por hectárea.

$H$  = Altura dominante (m), de los 100 árboles mayores por hectárea.

$B$  = Área basal ( $m^2 / ha$ ).

$B_0, B_1, B_2, B_3$  = Parámetros.

$V$  = Volumen sólido sin corteza ( $m^3$  ssc/ha) para un índice de utilización de 5 cm.

- En eucalipto se acotaron clases para el IMA (incremento medio anual) a los 10 años de edad (Tabla N°8). De estas se desprende que los incrementos volumétricos pueden variar en un amplio rango, afirmación que es corroborada por las observaciones en terreno. Esta característica se ve acentuada por el efecto del micrositio sobre el crecimiento del rodal. Las clases de sitio así definidas se presentan en el Cuadro N°14.

**Cuadro N°14. Clases de IMA ( $m^3/ha/año$ ) estimado a los 10 años.**

Clase de IMA	( $m^3/ha/año$ )
I	>40
II	30 - 40
III	20 - 30
IV	10 - 20
V	<10

- Se observan diferencias grandes de rendimiento en puntos separados por pequeñas distancias debido a condiciones de micrositio.
- Para poder diferenciar grandes zonas de crecimiento se requiere disponer de un número mayor de parcelas permanentes, especialmente en aquellas zonas geográficas donde actualmente existe escasez. Frente a todo esto un apoyo fundamental lo constituye la validación y el control en terreno de las estimaciones realizadas con este tipo de herramientas.

- Para la especie *Eucalyptus globulus*, en aquellos sitios con condiciones edafoclimáticas similares en los que se midieron ensayos pertenecientes tanto a INFOR como a empresas, se apreciaron diferencias entre las clases de índices de sitio reportados para ambos tipos de ensayos. Éstos se pueden atribuir a variables que no fueron controladas como las condiciones genéticas del material utilizado, al manejo silvicultural aplicado a los ensayos, especialmente fertilización, y a las condiciones de micrositio.
- Se hace evidente la necesidad de efectuar nuevas mediciones en las parcelas permanentes del proyecto. Esto permitiría abarcar y reforzar el rango de edades entre 8 y 15 años, que actualmente presenta una evidente escasez de observaciones, y reduce la validez de las funciones desarrolladas en dicho rango. También se lograría una evaluación más completa de las ecuaciones de crecimiento en altura, y además la prueba de técnicas más complejas e intensivas de modelado.
- Los resultados de crecimiento y rendimiento, y las magnitudes de las variables mensuradas demuestran la variedad de comportamiento que puede presentar el *E. globulus*. Este mismo comportamiento puede esperarse de otras especies de eucalipto que se desarrollan en Chile, tales como *E. nitens*, *E. delegatensis* y *E. camaldulensis*.
- Es necesario continuar con la investigación para obtener series de crecimiento con una extensión de tiempo mayor, intentando captar de esta forma el crecimiento real, el efecto de la competencia y la mortalidad en el desarrollo de los rodales de eucalipto.
- Sería recomendable, además, incorporar ensayos de espaciamiento y obtener densidades óptimas para cada especie de eucalipto de interés.
- El conocimiento alcanzado en este proyecto debe ser integrado con los obtenidos con otros estudios desarrollados por INFOR (mejoramiento genético), incorporando, además, efectos del manejo (raleos, podas, herbicidas, fertilización) sobre las condiciones de crecimiento del eucalipto, tanto para la generación de productos de corto y largo plazo (pulpa y madera aserrada).
- El conocimiento desarrollado y las capacidades y recursos instalados le confieren a INFOR un gestión de liderazgo en el estudio del crecimiento del eucalipto.

