



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

DASOMETRIA PRACTICA

José Imaña-Encinas

Editora Universidade de Brasília
Brasília, 1998

Todos os direitos reservados.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser armazenada ou reproduzida, por
qualquer meio, sem a autorização por escrito da Editora.

Impresso no Brasil
EDITORA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
SCS Edifício OK Q. 2 NQ 78
70300-500 Brasília, DF

Copyright © 1998 by José Imaña-Encinas

Direitos exclusivos para esta edição:
Editora Universidade de Brasília

Coleção de Textos Universitários

Esta coleção visa publicar textos produzidos pelos docentes para uso em sala de aula,
fomentando a criação de material didático na própria UnB.

A atual edição preliminar é impressa pelo processo reprográfico.
Os textos são de responsabilidade dos autores e respectivos departamentos e poderão ser
aperfeiçoados para aproveitamento em futuras edições, sob a forma de livro.

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca Central da Universidade de Brasília

I31 Imaña - Encinas, José
Dasometria practica / José Imaña-Encinas. - Brasília : Editora
Universidade de Brasília. 1998.

112 p. - (Coleção textos universitários)

I. Mensura forestal. 2. Inventario forestal. 3. Dendrometria. I. Título. II
Série.

CDU 634.0.5
634.0.2

AGRADECIMIENTO

A mi esposa
Hilda Orellana de Imaña
por su constante y decidido incentivo
en la elaboración de este documento,
y por su enorme paciencia, amor y compañerismo
durante nuestra estadía en el Instituto de Biometría Forestal
de la Universidad de Freiburg – Alemania,
mi especial agradecimiento

José Imaña Encinas
Freiburg, 1998

Contenido

Página

Presentación	1
I. Conceptos de dasometria	2
1. Origen de la dendrometria	2
2. Importancia de la dasometria	3
3. Situación actual de la mensura forestal	4
4. Clasificación de los bosques	5
5. Forma y tipos de árboles	7
6. Variables dendrométricas	9
6.1 Unidades de medida	9
6.2 DAP y otros diámetros	10
6.2.1 Instrumentos de medición	13
6.2.2 Clases diamétricas	18
6.3 Area basal	20
6.3.1 Principio de Bitterlich	22
6.3.2 Barra de Bitterlich	24
6.3.3 Prisma basimétrico	24
6.4 Altura	26
6.4.1 Métodos e instrumentos basados en principios geométricos	27
6.4.2 Instrumentos basados en principios trigonométricos	30
6.4.3 Errores	34
6.4.4 Relaciones hipsométricas	35
6.5 Práctica dendrométrica	36
6.6 Factor de forma	41
6.6.1 Factor volumétrico de forma	42
6.6.2 Factor diamétrico de forma	42
II. Volumetria	47
1. Fórmulas	47
2. Cubicación rigurosa	51
2.1 Cubicación analítica	51
2.2. Cubicación gráfica	51
3. Tablas de volumen	53
3.1 Ecuaciones volumétricas	57
3.2 Criterio de selección de la ecuación	63
3.3 Método de los árboles modelo	65
3.3.1 Método de Draudt	66
3.3.2 Método de Urich	67
3.3.3 Método de Hartig	67
3.3.4 Método de Hossfeld	68
3.3.5 Método del árbol modelo	68
3.4 Precisión de la tablas	69

III.	Inventarios forestales por muestreo	70
	1. Definición de inventario forestal	70
	1.1 Clasificación de los levantamientos por muestreo	71
	2. Conceptos de muestreo	72
	2.1 Parámetros dendrométricos	73
	2.2 Estimadores estadísticos	73
	2.3 Cálculo probabilístico	74
	2.4 Teoría de las muestras	76
	3. Parcelas de medición dasométrica	77
	4. Tipos de inventarios	77
IV.	Inventario forestal enteramente casualizado	80
	1. Características del rodal	80
	2. Diseño del muestreo	80
	3. Análisis estadístico	81
	4. Resultados	81
	4.1 Cálculo de los parámetros dendrométricos	84
	5. Discusión	89
	5.1 Conclusiones	90
V.	Planificación de un inventario forestal	91
	1. Consideraciones preliminares	91
	2. Factores tiempo y personal	92
	3. Medios de planificación	93
	3.1 Red PERT/CPM	93
	4. Manual de campo	94
VI.	Inventario forestal por franjas de muestreo	99
	1. Metodología	99
	2. Variables de cálculo	100
	3. Análisis estadístico	100
	4. Resultados y discusión	101
VII.	Inventario forestal fitosociológico	103
	1. Objetivos del estudio de caso	103
	2. Características del local	103
	3. Modelo de muestreo	104
	3.1 Proceso de medición	106
	3.2 Proceso de cálculo	107
	4. Resultados	108
	4.1 Conclusiones	109
VIII.	Referencias bibliográficas	110
	Anexos	112

Lista de Figuras

	Página
Figura N° 1. Tipos de árboles	7
Figura N° 2. Apariencias de árboles latifoliados	8
Figura N° 3. Componentes del árbol según Prodan	8
Figura N° 4. Componentes del árbol según Malleux	9
Figura N° 5. Clasificación de diámetros	10
Figura N° 6. Puntos de medición del DAP	12
Figura N° 7. Diámetros convencionales	13
Figura N° 8. Error instrumental de la forcípula	14
Figura N° 9. Principio óptico de la regla de Biltmore	15
Figura N° 10. Forcípula finlandesa	16
Figura N° 11. Visión de las escalas del relascopio	16
Figura N° 12. Pentaprisma	17
Figura N° 13. Distribución diamétrica	18
Figura N° 14. Trinchete diamétrico	19
Figura N° 15. Parcela de área variable	21
Figura N° 16. Demostración del principio de Bitterlich	23
Figura N° 17. Prisma basimétrico	25
Figura N° 18. Puntos de medición de la altura total y comercial	26
Figura N° 19. Forma de troncos y puntos de medición de la altura comercial	27
Figura N° 20. Determinación de la altura a través del hipsómetro de Merrit	28
Figura N° 21. Lecturas de alturas a través del principio trigonométrico	30
Figura N° 22. Medición de la variable altura empleando instrumentos trigonométricos	31
Figura N° 23. Hipsómetro Haga	32
Figura N° 24. Clinómetro Suunto	34
Figura N° 25. Determinación de la altura a través del clinómetro Suunto	34
Figura N° 26. Cubicación por el método de Hohenald	45
Figura N° 27. Figuras geométricas	47
Figura N° 28. Seccionamiento del tronco en sólidos geométricos	49
Figura N° 29. Determinación del volumen en pie	50
Figura N° 30. Cubicación gráfica	52
Figura N° 31. Curvas de cubicación	55
Figura N° 32. Curva de la distribución normal	75
Figura N° 33. Red PERT/CPM aplicado a un inventario forestal	95
Figura N° 34. Cronograma de Gantt-PERT	96
Figura N° 35. Muestras por franjas	102
Figura N° 36. Método malayo de muestreo lineal	104
Figura N° 37. Visualización de la lectura de altura a través del hipsómetro de Christen	116

Lista de Cuadros

	Página
Cuadro N° 1. Factores de conversión	11
Cuadro N° 2. Clasificación de 3546 árboles en clases diamétricas	19
Cuadro N° 3. Datos de campo de 40 árboles	36
Cuadro N° 4. Reordenación de los datos del cuadro N° 3 por orden creciente del DAP	37
Cuadro N° 5. Datos de altura total ordenados en orden decreciente y correspondiente valor de g	40
Cuadro N° 6. Cubicación rigurosa	43
Cuadro N° 7. Cálculo del coeficiente de forma	44
Cuadro N° 8. Cálculo del coeficiente de forma normal de acuerdo al principio de Hohenald	45
Cuadro N° 9. Volumen de las secciones en mts. cúbicos	46
Cuadro N° 10. Tabla de volumen de dos entradas	56
Cuadro N° 11. Orden de las variables para el cálculo de regresión	60
Cuadro N° 12. Número de árboles medidos	83
Cuadro N° 13. Parámetros dendrométricos	85
Cuadro N° 14. Determinación volumétrica en metros cúbicos	87
Cuadro N° 15. Parámetros medios calculados	101
Cuadro N° 16. Resultados de cálculo	102
Cuadro N° 17. Relación de especies comerciales	105
Cuadro N° 18. Distribución de la regeneración natural	106
Cuadro N° 19. Índice de almacenamiento y factor de establecimiento	108

Lista de Ejercicios

	Página
Ejercicio N° 1. Determinación de ángulos y lados de triángulos	5
Ejercicio N° 2. Transformación de unidades de medida	11
Ejercicio N° 3. Construcción de una regla de Biltmore	15
Ejercicio N° 4. Cálculo del error de los diámetros	20
Ejercicio N° 5. Demostración del principio de Bitterlich	22
Ejercicio N° 6. Cálculo del número de árboles por hectárea	23
Ejercicio N° 7. Determinación del área basal	24
Ejercicio N° 8. Construcción de un hipsómetro de Merrit	29
Ejercicio N° 9. Construcción de un hipsómetro de Christen	29
Ejercicio N° 10. Cálculo del DAP medio	36
Ejercicio N° 11. Cálculo de la altura media	39
Ejercicio N° 12. Identificación del árbol central	41
Ejercicio N° 13. Cálculo del coeficiente de forma	43
Ejercicio N° 14. Cálculo de cubicación rigurosa	53
Ejercicio N° 15. Cálculo de regresión, tabla de volumen de una entrada	59
Ejercicio N° 16. Elaboración de una tabla de volumen	62
Ejercicio N° 17. Identificación de parámetros dasométricos en diversos inventarios forestales	79

PRESENTACION

Por las peculiaridades propias de la especialidad de la Dasometria y por las dificultades que muchos de los técnicos e ingenieros forestales encuentran en la interpretación de asuntos dendro y dasométricos, la ausencia de libros textos en español y a fin de contribuir con el desarrollo del sector forestal latinoamericano se vió por conveniente elaborar un documento que pudiese sintetizar algunos de los fundamentos y asuntos de la medición forestal que frecuentemente son motivo de preocupación en su correspondiente interpretación dasométrica.

Dado el caracter general del presente documento que se presenta, el autor Prof. Dr. José Imaña Encinas catedrático titular del área de mediciones forestales de la Universidad de Brasilia (Brasil) solicita sea considerado como guia de introducción y de esa forma pretende ser una ayuda memoria de diversos temas que frecuentemente son abordados en la práctica dasométrica, procurando ofrecer a los colegas que actuan en esta área algunos subsidios de orientación.

El documento que se presenta fué elaborado durante la permanencia del autor en el Instituto de Biometria Forestal de la Universidad de Freiburg (Alemania).

I. CONCEPTOS DE DASOMETRIA

La presente monografía presenta de forma objetiva algunas de las técnicas y criterios de la dasometría práctica que día a día el ingeniero forestal podrá encontrar en sus actividades correspondientes.

Considérese el presente documento como una referencia de orientación de algunos temas que se presentan en las actividades dasométricas, motivando a quien pueda interesar un inicio en el detallamiento de esta especialidad.

El ingeniero forestal en la práctica diaria adquiere evidentemente una experiencia profunda de biólogo forestal aplicando conocimientos al manejo racional y sustentado de los bosques. La especialidad de la dasometría direcciona al técnico forestal más hacia el lado matemático sin descuidar por supuesto de las leyes del equilibrio natural ecológico de los bosques y del medio ambiente.

1. Origen de la dendrometría

La palabra dendrometría deriva de los vocablos griegos: dendro que significa árbol y metría = medida. Consecuentemente la dendrometría se ocupa de las mediciones o variables de medida en el árbol. El concepto de la medición forestal se fundamenta en identificar y cuantificar dentro del bosque, árbol o parte de él números a propiedades directamente ponderables como objetos físicos o eventos. La dendrometría también fué definida como la matemática de medición cuantitativa y cualitativa del árbol y sus productos.

La dendrometría es una rama de la ciencia forestal que surgió cuando los hombres sintieron la necesidad de estimar o determinar cuantitativamente lo que poseían en términos de recursos forestales.

Se pregunta: Como se desarrolló la Dendro o Dasometría durante los siglos 17 y 18, y cuales las razones que la llevaron hasta nuestros días, sin que entrase en decadencia?

Existieron épocas en que la destrucción de los bosques fué prácticamente planificada. En Inglaterra durante el reinado de Carlos I se otorgaron recompensas al transformar áreas boscosas en plantaciones agrícolas principalmente para aquellas áreas destinadas al cultivo de cereales. En Escocia se produjo el mismo fenómeno para incrementar la producción de ovejas. En regiones de Alemania, Francia, Italia y Suiza cuando la madera comenzó a escasear (época del apogeo marítimo de Holanda) los pueblos de estas regiones comenzaron a estimar con bastante precisión lo que se retiraba de los bosques, surgiendo así los primeros métodos de medición de los productos y subproductos forestales.

Inclusive hoy en día la prensa mundial comunica y critica la destrucción sistemática de los bosques, es el caso por ejemplo de los programas de colonización, abertura de áreas boscosas para la instalación de polos de desarrollo y otras situaciones que en principio desconocen las funciones sobre todo secundarias del bosque (protección y manutención del agua en calidad y cantidad, etc.). Esta situación obliga al técnico e ingeniero forestal debatir esos hechos y para tal la dendro y dasometria podrá ofrecer sólidos parámetros de discusión.

2. Importancia de la dasometria

El término dasometria tiene su origen de las palabras griegas daso = bosque y metria = medición. La dasometria como doctrina comienza por ocuparse del árbol (dendrometria) como individuo de observación para después pasar a la colectividad o masa forestal (bosque) como objeto de medición. En consecuencia la dasometria nos enseña los fundamentos y técnicas operativas de las producciones forestales.

La importancia de la dasometria en la ciencia forestal puede ser comprendida por el hecho de estar estrechamente vinculada con otras áreas como la silvicultura, manejo, ordenación y economía forestal. De tal forma que no debe existir técnico o ingeniero forestal que no sepa medir e interpretar las diversas variables dendrométricas.

En el proceso histórico de la dasometria se deben destacar los siguientes hechos como los más importantes para su desarrollo y consolidación como especialidad forestal:

Doebel y Beckmann en 1759 presentan estudios y sugerencias para determinar la masa forestal.

Oettel en 1765 utiliza por la primera vez correlaciones matemáticas con variables dendrométricas, considerándolo al tronco del árbol como una figura geométrica y en 1787 son publicadas las primeras tablas de cubicación forestal.

Cotta en 1804 fabrica y utiliza por la primera vez la forcípula en la medición del DAP y son publicadas las primeras tablas de volumen que en su principio son válidas hasta nuestros días.

Smalian en 1837 describe su fórmula para la determinación del volumen.

Hennert en 1840 demuestra la aplicabilidad del método xilométrico.

Bitterlich en 1948 presenta el método de medición angular para determinar el área basal por hectárea y consecuente fabricación del relascopio de espejo.

3. Situación actual de la mensura forestal

En países donde la ciencia forestal está desarrollada, la dendro y dasometría adquieren importancia en el sentido de que contribuyen activamente al conocimiento y evaluación de los bosques, de sus productos y principalmente en la elaboración de los planos racionales de silvicultura, de ordenación, de manejo y de explotación de los recursos forestales.

Consecuentemente la especialidad de la medición forestal surge para atender tres finalidades:

- a. comerciales,
- b. de ordenamiento,
- c. de investigación,

siempre bajo el principio del rendimiento sustentado que Speidel (1976) lo define así: "mantener la capacidad de un bosque de modo a producir permanentemente y racionalmente no solo productos forestales como también contribuciones a la infraestructura a través de bienes indirectos en favor de las generaciones presentes y futuras".

Para atender a estos objetivos la medición o determinación de las variables dendrométricas se la realizará en árboles en pie, en troncos apeados y en partes (componentes) del árbol.

La actual actividad de la mensura forestal incluye principalmente métodos estadísticos, levantamiento de datos de campo y procesamiento electrónico de cálculo. De tal forma que los estudios de crecimiento y de producción en diferentes sistemas de ordenamiento y de calidades de sitio, citándolos solo como ejemplo, son comprendidos como elementos de observación dendrométrica o dasométrica.

La posibilidad de identificar los errores de medida en las diversas variables dendrométricas permite clasificarlos en:

a. Errores sistemáticos, aquellos que están en el instrumento de medición (defecto de fabricación) y que son imposibles de minimizarlos. La poca habilidad por parte del operador en el uso correcto de los instrumentos es también un error de este grupo, el mismo que puede ser casi que eliminado.

b. Errores compensantes, son los que no dependen del operador y se presentan por ejemplo al transformar unidades de medida.

c. Errores de estimación, son aquellos provenientes de los cálculos estadístico y de muestreo.

$$\text{Valor real} - \text{Valor estimado} = \pm \text{Error}$$

La presencia y el conocimiento de los errores influyen directamente en la precisión o exactitud del trabajo realizado. Por precisión se entiende al error patrón de estimación que es un valor relativo dependiente de lo que se esté midiendo. La exactitud se refiere a la mayor o menor aproximación de la variable al valor verdadero.

Considerando el concepto del error en los cálculos dendrométricos, se clasifican los tipos de medición en medidas directas e indirectas. Medidas directas permiten la determinación de la variable dendrométrica (contacto directo del instrumento con la variable que se mide). Medidas indirectas permiten realizar la estimación de la variable normalmente haciendo uso de instrumentos ópticos.

Los métodos de medición indirecta se fundamentan en las relaciones geométricas (teorema de Pitágoras) o en principios trigonométricos (ley de los senos y cosenos).

Ejercicio N° 1. a). En un triángulo rectángulo de lado $a = 15$ cm (hipotenusa = b) y ángulo alfa = 28 grados, determinar a través de la ley de los senos, los otros lados del triángulo y sus ángulos correspondientes.

b). En un triángulo obtuso de lado $a = 10$ cm, $c = 5$ cm y ángulo beta = 120 grados, determinar a través de la ley de los cosenos el lado b y los ángulos alfa y gama.

Resultados para a):

$a = 15,00$ cm	alfa = 28°
$b = 31,95$ cm	beta = 90°
$c = 28,21$ cm	gama = 62°

Resultados para b):

$a = 10,00$ cm	alfa = 40° 03' 06''
$b = 13,23$ cm	beta = 120°
$c = 10,00$ cm	gama = 19° 56' 54''

4. Clasificación de los bosques

La clasificación de los vegetales tuvo su inicio en Grecia. Theophrastus (370 - 285 a.C.) discípulo de Aristóteles procuró distinguir características anatómicas entre árboles, arbustos, subarbustos y hierbas. Linneu (1707 - 1778) establece la nomenclatura binaria. Lamarck (1744 - 1829) introduce la llave dicotómica y la clasificación natural. Eichler (1839 - 1887) desarrolla el método filogenético que procura establecer la evolución de las especies a través de una filiación tomando como base los principios de Darwin. Engler (1844 - 1930) tomando como fundamentos los estudios de Eichler introduce el sistema de

clasificación adoptado hasta los días de hoy. Vale decir que los vegetales debido a su infinita cantidad se los agrupa en función del grado de parentesco y de sus caracteres afines.

Para atender los objetivos de la dendrometría y de la ordenación forestal se entenderá como árbol simplemente al individuo vegetal que produce madera, de tronco elevado (mayor a los 3 metros de altura) formando en su parte superior una extensa ramificación (ramas) constituyendo la copa del árbol.

La silvicultura clasifica a los árboles de acuerdo a su altura en tres categorías:

- árboles mayores, con alturas superiores a 30 m.
- árboles medios, con alturas entre 15 y 30 m.
- árboles pequeños, con alturas inferiores a 15 m.

Otra clasificación de los árboles está en función de la formación de madera en el tronco principal, que identifica como:

- brinzal, al individuo que aún no presenta un diámetro mínimo exigido (normalmente son aquellos con un DAP menor a 5 cm);
- latizal, al individuo que es considerado (incluido) en las primeras clases diamétricas pero aún con un DAP inferior al exigido en el proceso de explotación maderera.

Dentro del concepto silvicultural los macizos forestales podrán ser divididos en bosques naturales y plantaciones. El manejo y ordenación de estos vuelos forestales será por supuesto diferente, pero de cualquier manera los datos básicos obtenidos por la dendrometría tendrán en su interpretación la misma utilidad.

Bosque natural será aquella formación vegetal constituida por varios espécimens de varias especies. Esta estructura será por supuesto bastante más compleja que en las plantaciones donde predomina cierta homogeneidad en las variables dendrométricas.

a. Bosques de producción, son aquellos que tienen por objetivo abastecer los mercados con materia prima forestal.

b. Bosques de protección, son los que tienen como función el de proteger la fauna y flora nativa, los suelos y el agua manteniendo y conservando siempre el equilibrio ecológico del local.

c. Bosques de recreación, son los que ofrecen ambientes de recreación y paisajismo, de tal forma que las variables dendrométricas bien interpretadas ofrecerán subsídios sólidos en la definición de uso y conservación de esos ecosistemas.

5. Forma y tipos de árboles

El concepto de aprovechamiento del árbol en regiones tropicales está relacionado al grado de utilización de la madera, dependiendo naturalmente del nivel de desarrollo de la industria forestal y de la región o país como un todo.

El crecimiento de los árboles y su fisonomía están en función directa de las exigencias naturales del medio ambiente y del efecto de la intervención de los sistemas de manejo y de ordenación. Las especies forestales demuestran poseer plasticidad de acomodación a esas exigencias lo que permitirá que una misma especie plantada y tratada en condiciones diferentes producirá evidentemente diversas formas (apariencias) de crecimiento.

En ese principio Mackay (1964) define:

- la forma natural o espontánea del árbol, cuando su cuerpo axial así como sus ramificaciones consiguen crecer libres de obstáculos (caso de un árbol aislado),

- la forma forestal, resultante del desarrollo del árbol en una plantación o macizo forestal. El crecimiento de las ramas en esas condiciones estaría perjudicado por la presencia de un otro individuo (vecino de crecimiento) con el mismo ímpetu de querer desarrollarse.

Intervenciones silviculturales como la poda, la desrama, los desbastes, etc. permitirán al silvicultor forzar la forma de crecimiento de los árboles, a fin de optimizar rendimientos biológicos y económicos.

Para fines dendrométricos los árboles de acuerdo a la forma que se presentan se los podrá clasificar groseramente en coníferas, latifoliadas y palmeras (Figura N° 1). Ya que en nuestro medio predominan las latifoliadas, en la práctica común se podrán encontrar árboles como se muestra en la Figura N° 2.

Figura 1. Tipos de árboles

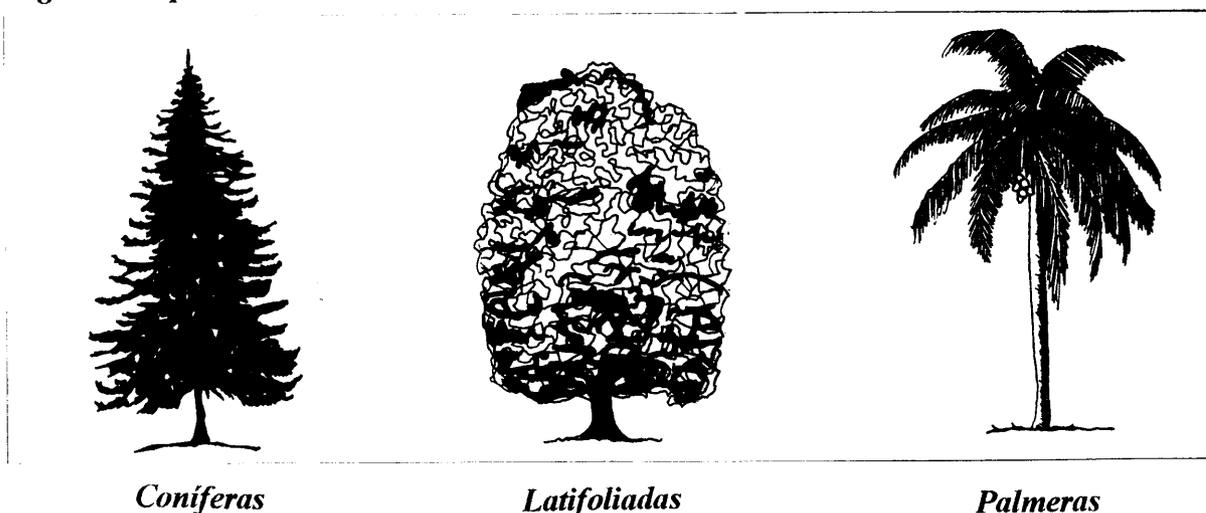
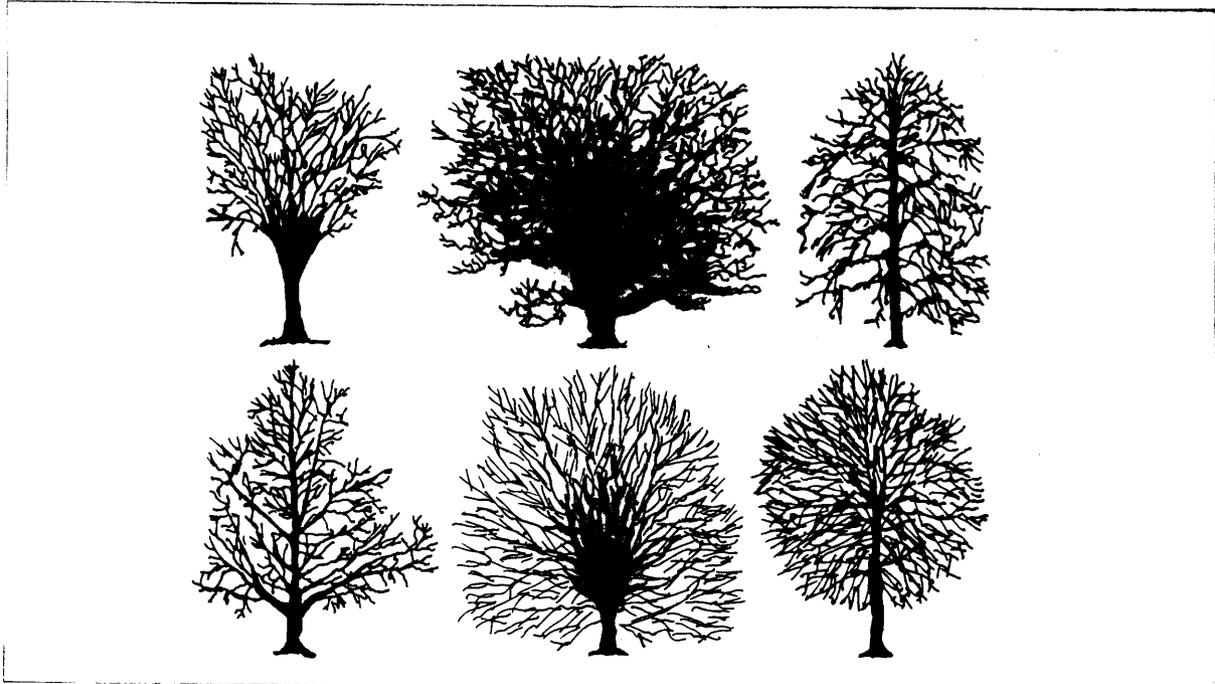
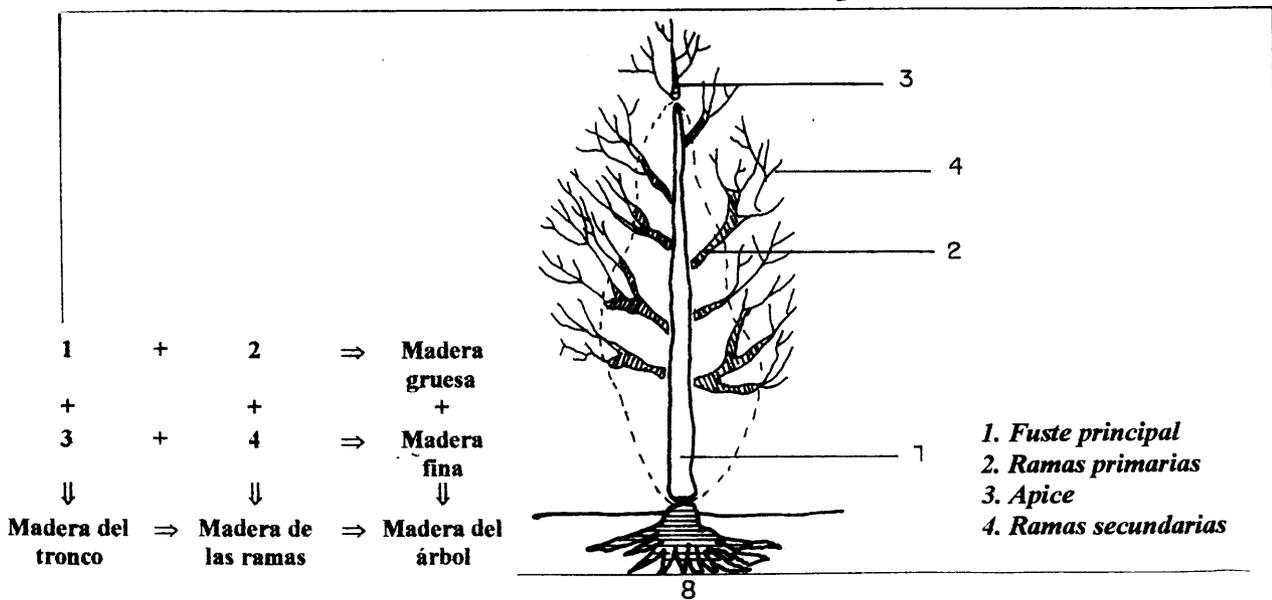


Figura 2. Apariencias de árboles latifoliados



De acuerdo a la utilización del árbol como productor de materia prima para la industria maderera, Prodan (1965) divide al árbol en cuatro componentes: tronco principal, ramas primarias, ápice y ramas secundarias como se muestra en la Figura N° 3. Al considerar plantaciones industriales el mismo autor establece la siguiente relación de utilización integral, dependiendo a priori de la intensidad de manejo que se realice en la plantación o macizo forestal y del estado de desarrollo forestal de la región (de acuerdo a la Figura N° 3):

Figura 3. Componentes del árbol según Prodan



Además de los componentes identificados por Prodan, Young (1978) en los estudios que realiza sobre la biomasa forestal incluye el tocón y las raíces de acuerdo a los siguientes criterios:

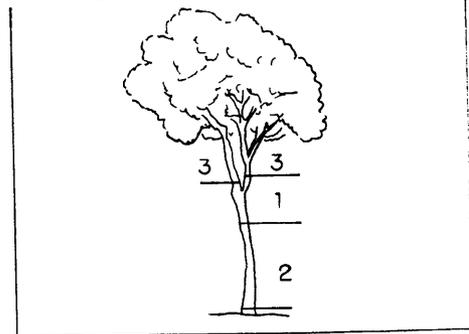
- a. raíz con menos de 1 pulgada de diámetro
- b. raíz de 1 - 4 pulgadas de diámetro
- c. raíz con más de 4 pulgadas de diámetro
- d. tocón
- e. tronco comercial con más de 4 pulgadas de DAP
- f. ramas con más de 1 pulgada de diámetro
- g. ramas con menos de 1 pulgada de diámetro
- h. ápice (no comerciable).

Esta clasificación se torna muy útil cuando se trabaja en la determinación de la biomasa forestal.

Malleux (1971) de acuerdo a las características de la industrialización maderera del Perú y el origen de la materia prima extraída de bosques tropicales naturales, propone dividir al árbol en tres secciones con la siguiente clasificación:

Figura 4. Componentes del árbol según Malleux

- (2) madera para aserradero
 - (1) madera para minas (puntales)
 - (3) madera para pulpa de celulosa y conglomerados
- como se muestra en la Figura N° 4.



6. Variables dendrométricas

Tomando en cuenta de que el árbol y el bosque en términos económicos debe producir ingresos reales, en conceptos dendrométricos se podrá calcular el interés producido de cierto capital forestal. A ejemplo se cita la madera en pie como capital y su crecimiento volumétrico anual como interés. En ese sentido todos los productos primarios y secundarios del árbol y del bosque podrán ser medidos e interpretados.

6.1 Unidades de medida

Cuando se trata de medir un objeto es necesario seleccionar la unidad de medida en función de la cual se expresará su magnitud. En los países latinoamericanos para medir las variables dendrométricas fué adoptado el sistema métrico pero será necesario por parte del técnico forestal conocer el sistema inglés a fin de poder interpretar los parámetros dendrométricos que se presentan en la literatura. Considérese que el actual avance tecnológico forestal está dado principalmente en los países de lengua inglesa.

En el Cuadro N° 1 se presentan los factores de conversión frecuentemente empleados en las mediciones forestales.

Ejercicio N° 2. Se solicita transformar las siguientes unidades:

- a. 674260 pulgadas cuadradas en hectáreas y pies cuadrados
- b. 674,26 pies tablares en metros cúbicos y pies cúbicos
- c. 67,426 hectáreas en metros cuadrados y pies cuadrados
- d. 67,426 hectáreas en acres y millas cuadradas
- e. 67426 pies cúbicos en centímetros cúbicos y metros cúbicos
- f. 6742,6 cuerdas en metros cúbicos y pies cúbicos
- g. 6742,6 pies cuadrados en centímetros cuadrados y hectáreas
- h. 674,26 acres en metros cuadrados y hectáreas
- i. 6742,6 pulgadas cuadradas en centímetros cuadrados y yardas cuadradas
- j. 67,426 hectáreas en cadenas

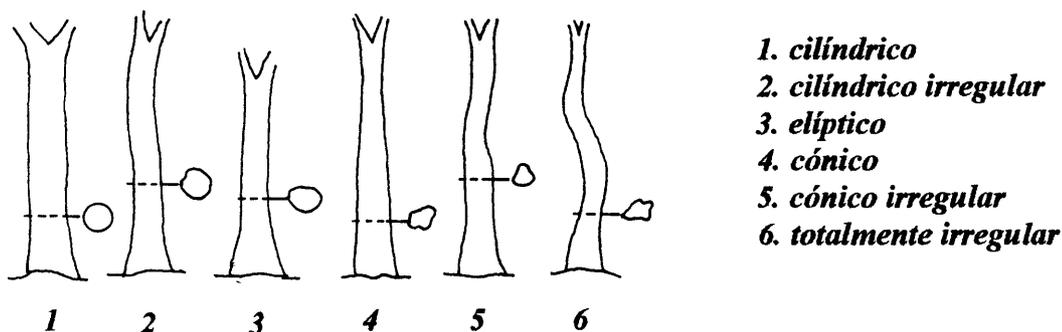
Resultados correspondientes véase en el Anexo N° 1 (página 113).

6.2 DAP y otros diámetros

Los diámetros y circunferencias son considerados como medidas fundamentales en la dendrometría por servir de base para cálculos y estimaciones de volúmenes de madera, índices de crecimiento, diversos sistemas de clasificación, etc.

En la dendrometría práctica los diámetros pueden ser clasificados como cilíndricos, cilíndricos deformados, elípticos, cónicos, cónicos deformados y de forma irregular como se muestra en la Figura N° 5.

Figura 5. Clasificación de diámetros



Cuadro 1. Factores de conversión

 Equivalencia en longitud:

1 centímetro	0,3937	pulgadas	1 yarda	0,9144	metros
1 metro	3,2803	pies	1 yarda	36	pulgadas
1 metro	39,37	pulgadas	1 yarda	3	pies
1 metro	1,0936	yardas	1 pie	12	pulgadas
1 kilómetro	0,621	millas	1 pie	0,3048	metros
1 pulgada	2,54	centímetros	1 cadena	66	pies
1 pulgada	0,083	pies	1 cadena	792	pulgadas
1 milla	1,6093	kilómetros	1 cadena	22	yardas
1 milla	1760	yardas	1 cadena	20,1168	metros
1 milla	5280	pies			

Equivalencia en área:

1 centímetro cuadrado	0,155	pulgadas cuadradas
1 metro cuadrado	10,764	pies cuadrados
1 kilómetro cuadrado	100	hectáreas
1 kilómetro cuadrado	0,3861	millas cuadradas
1 hectárea	0,003861	millas cuadradas
1 hectárea	10000	metros cuadrados
1 hectárea	2,471	acres
1 pulgada cuadrada	6,4516	centímetros cuadrados
1 pie cuadrado	0,0929	metros cuadrados
1 milla cuadrada	2,59	kilómetros cuadrados
1 milla cuadrada	259	hectáreas
1 milla cuadrada	640	acres
1 acre	0,4047	hectáreas

Equivalencia en volumen:

1 centímetro cúbico	0,061	pulgada cúbica
1 metro cúbico	35,3145	pies cúbicos
1 litro	61,0250	pulgadas cúbicas
1 litro	0,2642	galón (USA)
1 litro	0,0353	pies cúbicos
1 litro	1000	centímetros cúbicos
1 pulgada cúbica	16,3871	centímetros cúbicos
1 pulgada cúbica	0,0163	litros
1 pie cúbico	0,0283	metros cúbicos
1 galón (USA)	3,785	litros
1 pie tablar	0,00566	metros cúbicos
1 cuerda (90 pies cúbicos)	2,549	metros cúbicos

Equivalencia em masa:

1 kilo	2,2046	libras
1 tonelada métrica	1,102	toneladas cortas
1 tonelada métrica	0,9842	toneladas largas
1 tonelada métrica	1000	kilos
1 tonelada métrica	2204,6	libras

Otras equivalencias:

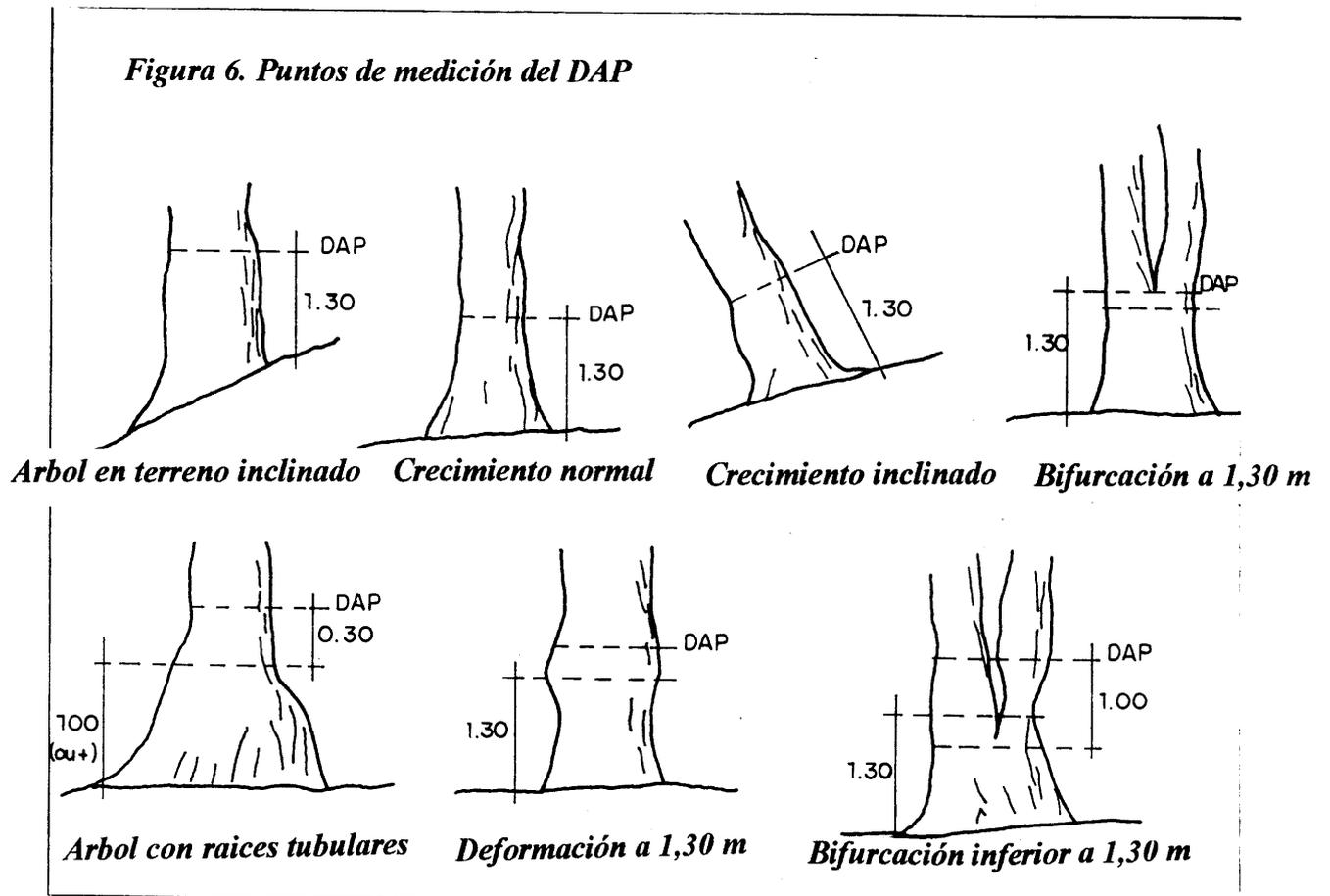
1 metro cuadrado/hectárea	4,356	pies cuadrados/acre
1 metro cúbico/hectárea	14,2913	pies cúbicos /acre
1 pie cuadrado/acré	0,2296	metros cuadrados/hectárea
1 pie cúbico/acre	0,0699	metros cúbicos/hectárea

La medida más típica del diámetro en un árbol es el diámetro a la altura del pecho (1,30 m) que se lo representa por DAP. Cuando por conveniencia se mide la circunferencia del tronco a 1,30 m de altura del suelo, se estará tratando del CAP, de tal forma que esa medida puede ser considerada equivalente al DAP conforme:

$$DAP = CAP / \pi$$

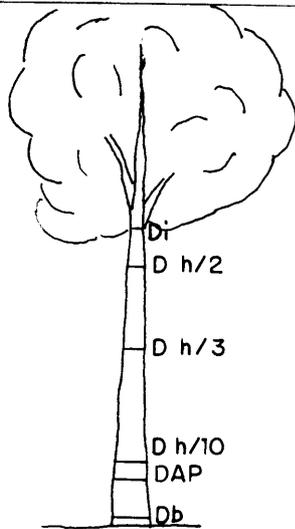
Cuando el tronco a la altura del DAP no fuese circular se deben considerar dos medidas perpendiculares a fin de estimar mejor el verdadero valor del DAP, a través del promedio aritmético.

El punto de medida del DAP puede ser alterado en función de algunas características específicas como se muestra en la Figura N° 6.

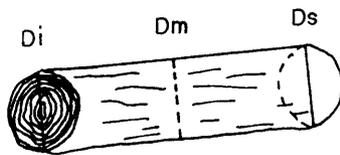


Muchas veces será necesario medir diámetros a distintas alturas ya sea en árboles en pie o en troncos apeados (ver Figura N° 7). Analizando esa figura, aún será común encontrar en la literatura medidas de diámetro a alturas fijas, como D_{7m} , D_{9m} , etc.

Figura 7. Diámetros convencionales



- D_{ic}** *Diámetro inicio de la copa*
- $D_{h/2}$** *Diámetro a la altura media*
- $D_{h/3}$** *Diámetro a un tercio de altura*
- $D_{h/10}$** *Diámetro a un décimo de altura*
- DAP** *Diámetro a la altura del pecho (1,30 m)*
- D_b** *Diámetro de la base*
- D_{7m}** *Diámetro a 7 m de altura*



- D_i** *Diámetro inicial*
- D_m** *Diámetro medio*
- D_s** *Diámetro superior*

Se podrá incluir o eliminar el grosor de la corteza del valor del diámetro. En ese caso el DAP se indicará por DAPs/c (DAP sin corteza). Para la reducción correspondiente se utilizará la fórmula:

$$DAP_{c/c} = DAP_{s/c} + 2 \text{ Gr.C}$$

Gr. C = grosor de la corteza.

6.2.1 Instrumentos de medición

Existen varios instrumentos para medir directa o indirectamente el diámetro o circunferencia del tronco de los árboles. Entre los más conocidos y usados están:

a. Cinta métrica de 1,50 m de largo
instrumento simple y barato que proporciona alto grado de exactitud en las medidas de circunferencia.

b. Cinta diamétrica
instrumento propio para medir diámetros de grandes dimensiones. Su escala está graduada en intervalos de π (3,1416) de acuerdo a la siguiente formulación:

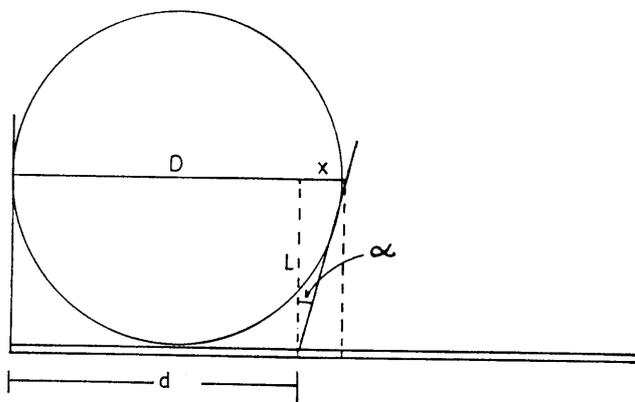
$$\text{diámetro} = \text{circunferencia} / \pi$$

Se debe considerar que cuando el tronco tuviese una forma elíptica, el diámetro medido será mayor de aquel de forma circular conteniendo valores iguales en área.

c. Forcípula,

es el instrumento más utilizado en la práctica dasométrica. Cotta la idealizó y la utilizó ya en 1804. Cuando el instrumento es construido de metal leve (normalmente ligas de aluminio) se evita el error de medida producido con aquellos construidos inicialmente de madera. El error instrumental de la forcípula se muestra en la Figura N° 8.

Figura 8. Error instrumental de la forcípula



$D = \text{diámetro real}$
 $d = \text{diámetro medido}$

$$\text{tag } \alpha = x \cdot L$$

$$x = L \cdot \text{tag } \alpha$$

$$D = d + x$$

$$D = d + L \cdot \text{tag } \alpha$$

$$x = D - d$$

Cálculo del error en %

$$p = \frac{D - d}{D} \cdot 100$$

$$p = \frac{L \cdot \text{tag } \alpha}{D} \cdot 100$$

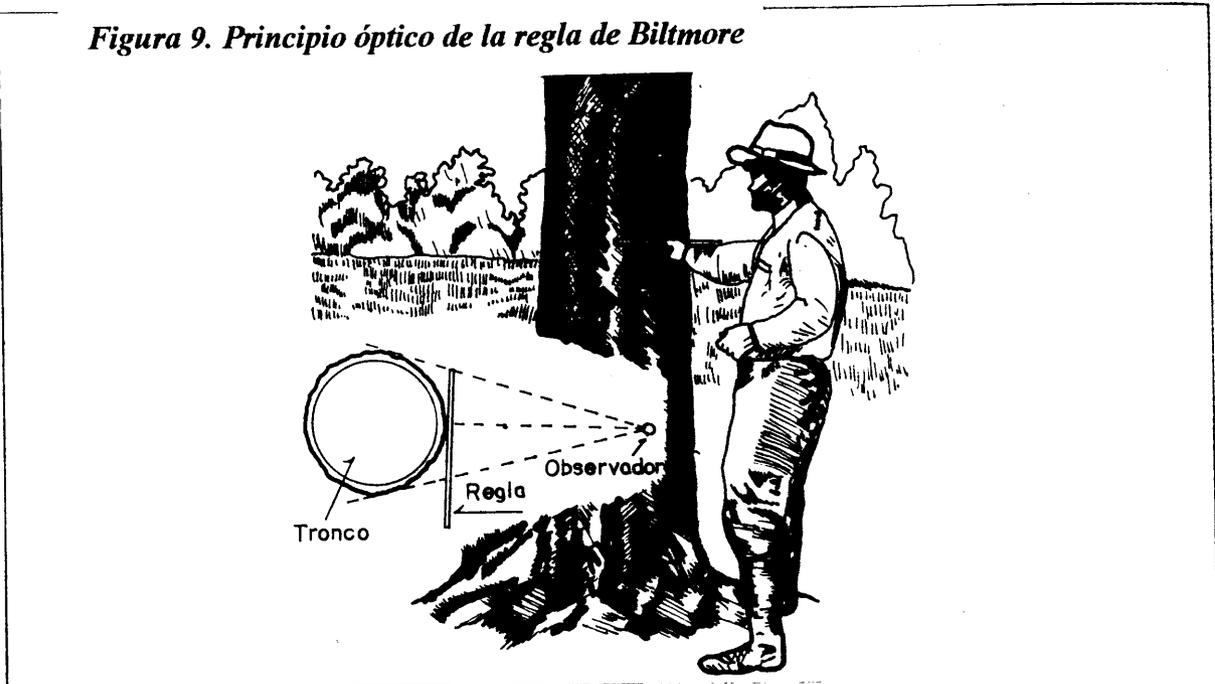
Dependiendo de la precisión deseada se podrán emplear forcípulas de precisión que son utilizadas únicamente en trabajos de investigación dendrométrica. En la práctica cotidiana la precisión de una forcípula esta dada a intervalos de 1 cm lo que satisface plenamente los objetivos de la dasometria.

El largo de la regla de la forcípula para que se torne de fácil manejo debe ser inferior a 120 cm. El mayor diámetro posible de medida será el correspondiente a dos veces el largo de los brazos paralelos (largo del brazo igual al valor del radio del tronco) desde que los extremos de los brazos alcancen los puntos tangenciales del tronco.

d. Regla Biltmore

instrumento de madera o metal liviano con un largo de aproximadamente 70 cm, permite la lectura directa del diámetro manteniéndolo apoyado al tronco y a cierta distancia constante del ojo (Figura N° 9). En el mercado norteamericano estas reglas están graduadas para trabajar a distancias fijas de 25 pulgadas. La graduación de la regla (CD = intervalo de cero hasta un cilindro de diámetro padrón) corresponde a la lectura directa del diámetro del árbol, principio que se fundamenta en la semejanza de triángulos.

Figura 9. Principio óptico de la regla de Biltmore



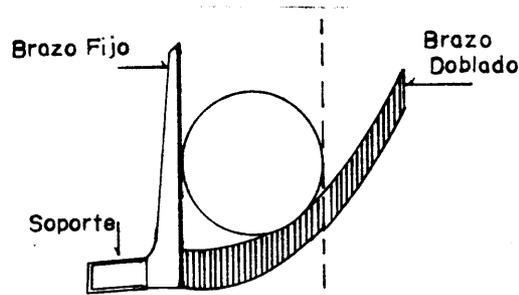
El principio para su construcción está dada por la fórmula:

$$CD = \frac{d}{\text{raiz de } 1 + (d/s)}$$

- CD = valor del diámetro en la escala a ser graduada
- d = diámetro del árbol (valor relativo para la construcción de la regla)
- s = distancia fija del ojo del observador a la regla (largo del brazo del operador)

Ejercicio N° 3. Se solicita construir una regla Biltmore en función del largo de su brazo. En el Anexo N° 2 se muestra la graduación de dos reglas correspondientes a un s = 56 y 65 cm respectivamente (página 114).

Figura 10. Forcípula finlandesa



e. Forcípula finlandesa

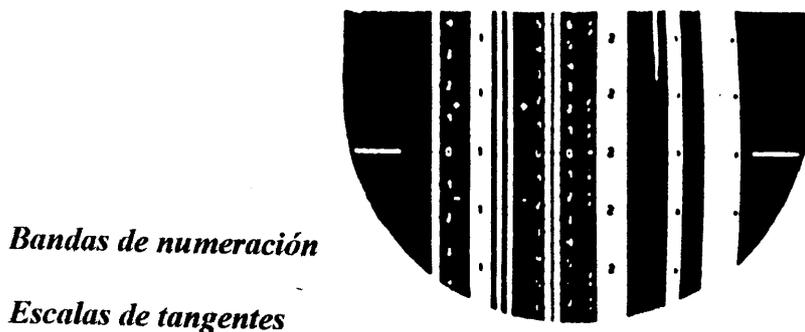
consiste en un arco parabólico graduado de acuerdo a su abertura (Figura N° 10). Esa abertura se la apoya al tronco en el punto donde se quiera hacer la lectura del diámetro. La lectura se la realiza en la visión paralela al brazo normal (brazo normal) de la forcípula, que corresponden a las tangencias del tronco.

En los países europeos (Finlandia y Suiza principalmente) esta forcípula es normalmente utilizada a alturas fijas de 7 y 9 metros. Para mantener constante esta altura se utilizan varas telescópicas.

f. Relascopio de Bitterlich

instrumento de alta precisión idealizado en 1948 por el Prof. Bitterlich en Austria. Para la medición de los diámetros usando el relascopio de escala normal se debe emplear la banda 1 más las bandas de los cuatro cuartos (Figura N° 11). La banda 1 está construida en una proporción entre el diámetro y la distancia del observador al árbol de 1:50. En ese principio dos bandas cuartas (mitad de la banda 1) estará manteniendo la relación de 1:100.

Figura 11. Visión de las escalas del relascopio



Bandas de numeración

Escalas de tangentes

Observando por la línea de horizonte a la banda 1 y estando a 20 m de distancia del árbol, el DAP de ese árbol tendrá:

- DAP = 20 cm cuando coincidir dos bandas cuartas con las tangencias del tronco
- DAP = 15 cm cuando coincidir 1,5 de las bandas cuartas con las tangencias del tronco
- DAP = 57 cm cuando coincidir la banda 1 más 1,7 de las bandas de los cuatro cuartos con las tangentes del tronco.

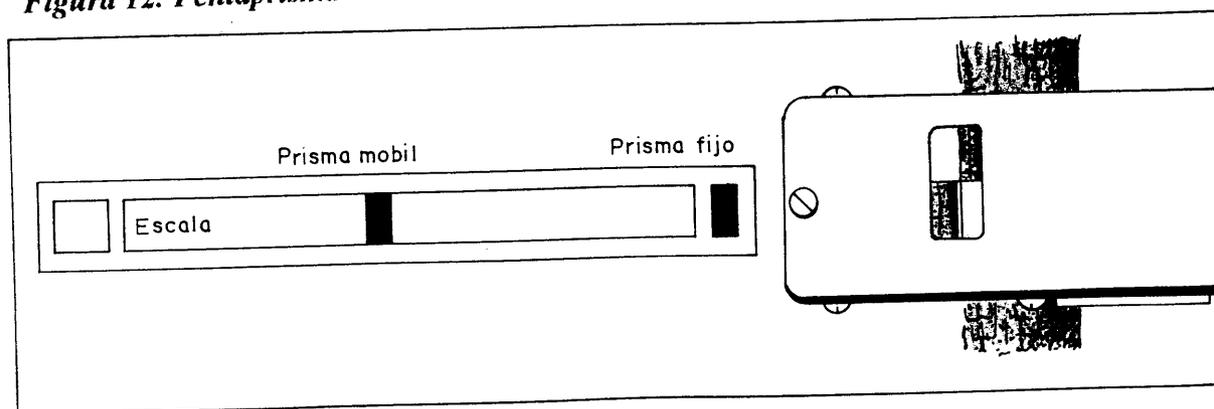
g. Pentaprisma de Wheeler

instrumento óptico propio para medir diámetros en diversas alturas. En los EE.UU. su uso es muy común en la determinación del diámetro mínimo comercial en árboles en pie que produce importante subsídío para la confección de tablas de volumen. Su intervalo de medición está comprendido entre 7,6 y 86,4 cm de diámetro.

El instrumento (un tubo rectangular de 85 cm) posee dos prismas, siendo uno de ellos fijo localizado en uno de los extremos del instrumento coincidiendo con el valor cero de la graduación. El instrumento establece líneas paralelas de visión. Una línea de visión es fija y la otra móvil lo que permite a través del prisma efectuar su lectura directa.

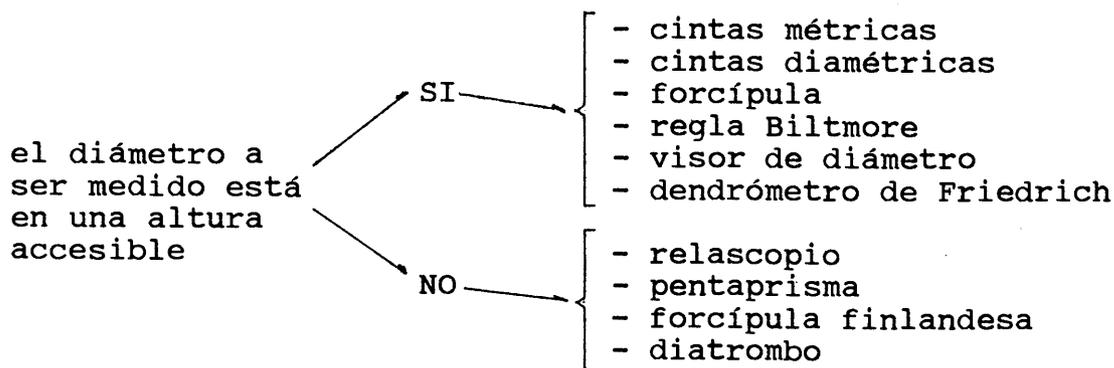
Para su uso el operador observa a través de la línea de ocular el punto en el tronco donde el diámetro será medido. En la parte superior del ocular se observará el lado izquierdo del tronco y por reflejo óptico del prisma fijo en la parte inferior el lado o margen derecha del tronco. Al prisma móvil (visor) se lo moverá hasta que la imagen del tronco se sitúe en forma tangencial opuesta uno sobre otro (Figura N° 12). La posición del prisma móvil permitirá la lectura directa del diámetro observado.

Figura 12. Pentaprisma



Instalando en uno de los extremos del instrumento un clinómetro, se podrá determinar las alturas donde el diámetro será medido. Este procedimiento requiere aún del conocimiento de la distancia horizontal del observador al árbol.

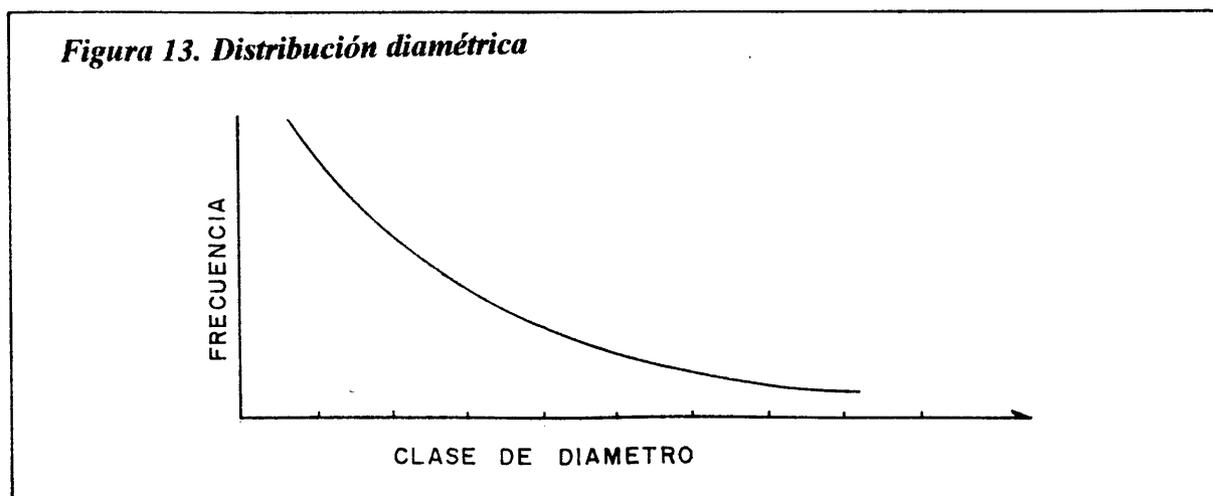
Considérese de forma genérica, en la selección del instrumento para medir o determinar el valor del diámetro, el resumen siguiente:



6.2.2 Clases diamétricas

En la práctica dasométrica los DAP's usualmente son agrupados en clases de diámetro con intervalos de 5 y 10 cm. La distribución de los diámetros en clases permite ingresar al cálculo estadístico ya que está demostrado que los diámetros de un macizo forestal están normalmente distribuidos. En ese sentido se podrá asumir en los cálculos matemáticos todas las leyes y principios que orientan la Curva de la Distribución Normal.

Una prueba de esa distribución está en el gráfico conocido como Curva de Distribución Diamétrica o Polígono de Frecuencias. La Figura N° 13 fué construida de acuerdo al Cuadro N° 2, datos reales obtenidos en un bosque tropical semi húmedo.

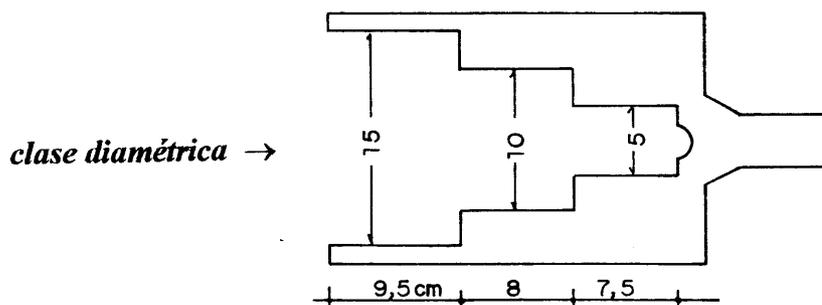


Cuadro 2. Clasificación de 3546 árboles en clases diamétricas

Clase diamétrica	PMC cm	Frecuencia	
		absoluta	relativa
20 - 30	25	1106	31,19
30 - 40	35	851	24,00
40 - 50	45	591	16,67
50 - 60	55	364	10,27
60 - 70	65	267	7,53
70 - 80	75	156	4,40
80 - 90	85	97	2,74
90 - 100	95	52	1,47
100 - 110	105	31	0,87
110 - 120	115	15	0,42
120 - 130	125	6	0,17
130 - 140	135	1	0,03
140 - 150	145	3	0,08
150 - 160	155	2	0,06
160 - 170	165	1	0,03
170 - 180	175	1	0,03
180 - 190	185	1	0,03
190 - 200	195	1	0,03
Totales		3546	100,00

Trinchete diamétrico, instrumento recomendado cuando se trata de determinar diámetros pequeños en clases diamétricas. La lectura de la clase diamétrica es directa una vez que el tronco ingresa dentro del trinchete. Para su construcción obsérvese que la altura lateral del trinchete debe tener una medida igual o poco superior al radio del mayor valor de la clase diamétrica (Figura N° 14).

Figura 14. Trinchete diamétrico



6.3 Area basal

Entiéndase por área transversal el área de cualquier sección del tronco del árbol. Un corte hipotético a cierta altura en todos los árboles de un macizo forestal producirá el área transversal de ese bosque. Si el área transversal fuese calculado en función del DAP se lo denomina de área basal, siendo de un otro diámetro = área transversal.

El área basal de un árbol se representa por "g" y el de un bosque por "G" teniendo como unidad padrón de referencia metros cuadrados por hectárea.

Aproximando el área basal a la superficie de un círculo su determinación se hará en función del diámetro o de la circunferencia medida

$$\begin{aligned}g &= \pi / 4 \cdot \text{DAP}^2 & g &= 0,7854 \cdot \text{DAP}^2 \\g &= \text{CAP}^2 / 4 \pi & g &= 0,0796 \cdot \text{CAP}^2\end{aligned}$$

Cuando el área basal de un árbol tiende a la forma elíptica se hace necesario determinar el DAP con dos medidas transversales, de tal forma que:

$$g = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D + d}{2} \right)^2$$

Considerando el área de una elipse como:

$$g = \pi/4 \cdot (D \cdot d)$$

el error se determinará por la diferencia de ambas áreas:

$$E (\%) = \frac{(D - d)^2}{4Dd} \cdot 100$$

Ejercicio N° 4. Cálculo del error de los diámetros.
De un árbol en pie, el DAP fué medido con la forcípula, en dos lecturas transversales:

$$\begin{aligned}D &= 24 \text{ cm} \\d &= 18 \text{ cm}\end{aligned}$$

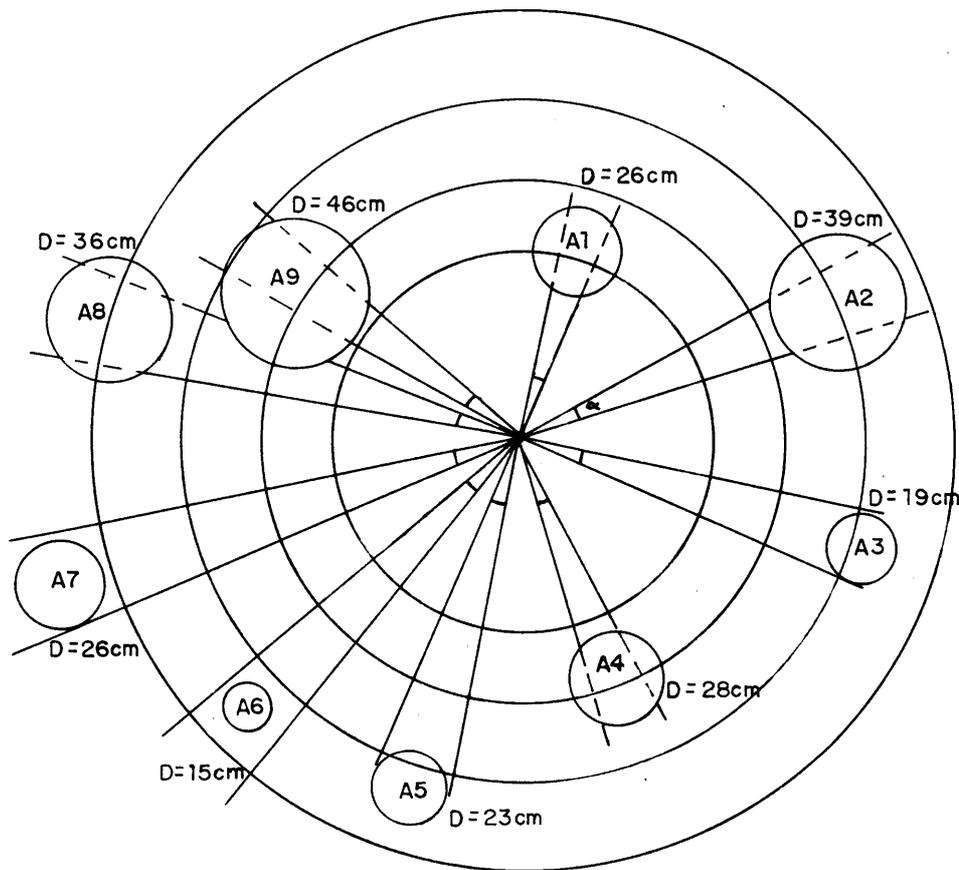
Se pregunta: a). Cuál el error de medida en función de su forma elíptica?

b). Cuál el valor de la circunferencia?

Respuestas de éste ejercicio, véase en el Anexo N° 3.

El área basal por hectárea también es considerada una medida de la densidad de un bosque que se expresa en m^2/ha .

Figura 15. Parcela de área variable



6.3.1 Principio de Bitterlich

El principio de Bitterlich define básicamente la densidad de un bosque determinando el área basal/ha a través de la lectura directa del número de árboles en las Parcelas de Área Variable o Prueba de Numeración Angular, idealizado por el Prof. Bitterlich. "El número de árboles (N) con DAP's iguales o superiores a un ángulo constante (alfa), vistos desde un punto fijo en el bosque, es proporcional a su área basal por hectárea" (Figura N° 15):

$$AB = N \cdot K$$

Demostración (véase Figura N° 16), supóngase un árbol con DAP igual a 20 cm. Por la relación:

$$d/L = D/R$$

$$\begin{aligned} R &= (D \cdot L) / d \\ R &= (20 \cdot 1) / 2 = 10 \end{aligned}$$

el árbol medido con DAP = 20 cm estará consecuentemente a 10 metros de distancia (distancia crítica).

Si el área (superficie) de la parcela es igual a:

$$A (\text{parcela}) = \pi \cdot R^2$$

$$A = 3,1416 \cdot 10^2$$

$$A = 314,16 \text{ m}^2$$

y el área basal del árbol será:

$$AB = \pi/4 \cdot \text{DAP}^2$$

$$AB = \pi/4 \cdot 20^2$$

$$AB = 314,16 \text{ cm}^2 = 0,031416 \text{ m}^2$$

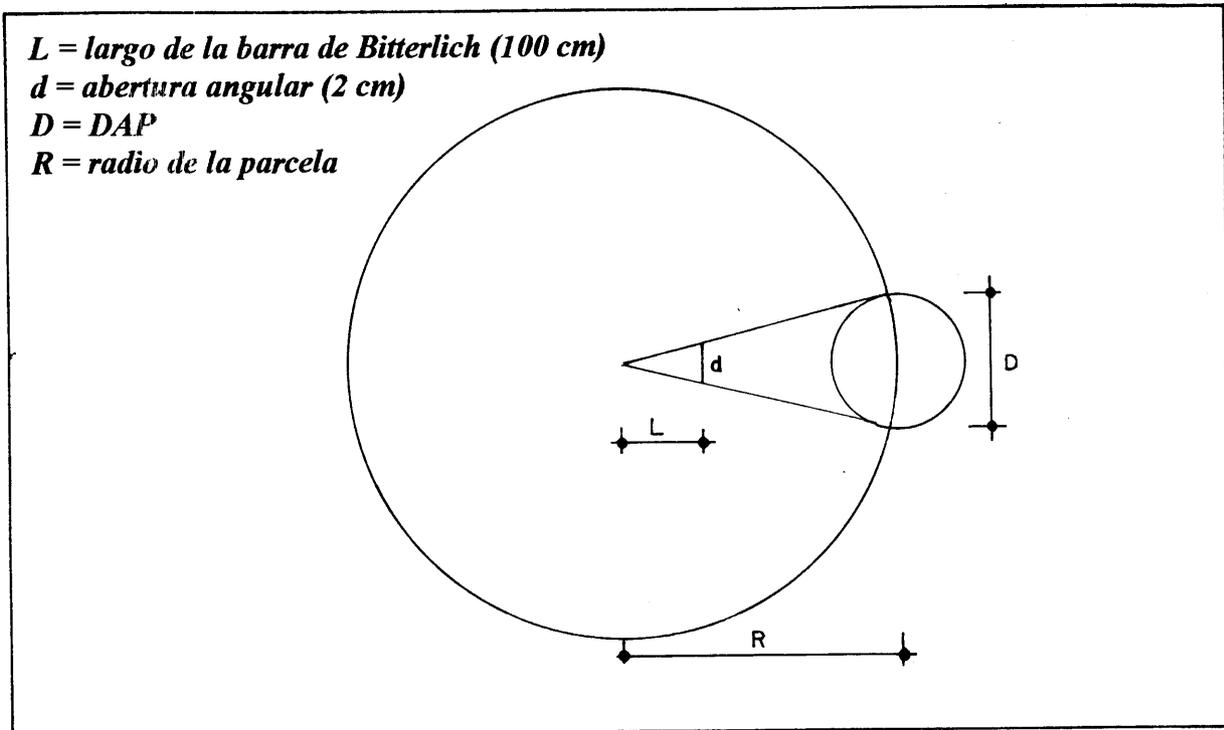
por simple regla de tres se tendrá:

$$\begin{array}{r} 314,16 \text{ m}^2 - 0,031416 \text{ m}^2 \\ 10.000 \text{ m}^2 - x \end{array}$$

en una hectárea existirá apenas un árbol o 1 m²/ha.

Ejercicio N° 5. Se solicita demostrar el principio de Bitterlich con un árbol que tuviese un DAP = 35 cm.

Figura 16. Demostración del principio de Bitterlich



Para estimar el número de árboles por hectárea, considerando el ejemplo anterior se tendrá por el postulado de Bitterlich:

$$n = \frac{10.000}{\text{área de la parcela variable de } R = \text{a la distancia crítica}}$$

$$n = \frac{10.000}{314,16} = 31,82$$

$$n = 32 \text{ árboles}$$

una vez que existe apenas 1 árbol con DAP = 20 cm en la parcela, se espera obtener en una hectárea 32 árboles con DAP = 20 cm.

- Ejercicio N° 6. a). Se solicita calcular el número de árboles/ha de la Figura N° 15.
 b). Si los DAP's estuvieran ordenados por clases diamétricas de 5 cm, dar conclusiones.

6.3.2 Barra de Bitterlich

Es un instrumento idealizado por el Prof. Bitterlich que consiste de una varilla rectangular de 1 metro de largo manteniendo en uno de sus extremos una placa metálica en forma de herradura cuya abertura es de 2 cm (Figura N° 16).

Asegurando la barra junto al ojo del observador y procediendo a un giro total de 360°, todos los troncos en la altura del DAP serán observados. Siguiendo el principio de que el diámetro observado es mayor a la abertura de los 2 cm (tangentes del tronco > ángulo alfa) ese individuo ingresará en el conteo de la Prueba de Numeración Angular (Figura N° 15). Si la abertura fuese mayor al DAP observado ese individuo no ingresa a hacer parte de la parcela de área variable y es despreciado. Cuando las tangentes del tronco a la altura del DAP coincide con la abertura el árbol entra a ser considerado como media unidad.

Por el postulado de Bitterlich "si en un punto cualquier del bosque observamos todos los árboles a nuestro alrededor y contamos el número de árboles (N) cuyo DAP aparente fuese superior a la abertura de la mira (ángulo alfa), éste número estará en relación directa con el área basal por hectárea", donde

$$G \text{ (m}^2\text{/ha)} = N \cdot K$$

K = 1 usando una barra de 1 m de largo y una abertura del visor de 2 cm.

Ejercicio N° 7. Cuál será el área basal (m²/ha) de la Figura N° 15.

6.3.3 Prisma basimétrico

Es un pequeño instrumento óptico que fué divulgado por Mueller (Alemania, 1953), Croner (Australia, 1954) y Bruce (EE.UU., 1955). Este instrumento, sencillo y barato presenta buena precisión cuando es empleado en terrenos con inclinaciones inferiores a 7%.

La graduación del prisma esta dada por dioptrias (di) correspondiendo una dioptria a la desviación de una unidad en 100 unidades de distancia, de acuerdo al siguiente principio: "la grandeza de la desviación de una imagen vista a través de un prisma es proporcional a su graduación en dioptrias". De esta forma un prisma de 2 dioptrias corresponde a una barra de Bitterlich de 1m de largo y abertura de visión de 2 cm, por tanto mantiene el factor:

$$K = 1$$

y en esa relación, un prisma de 4 dioptrias tendrá un factor

$$K = 4$$

La construcción del prisma obedece a la fórmula:

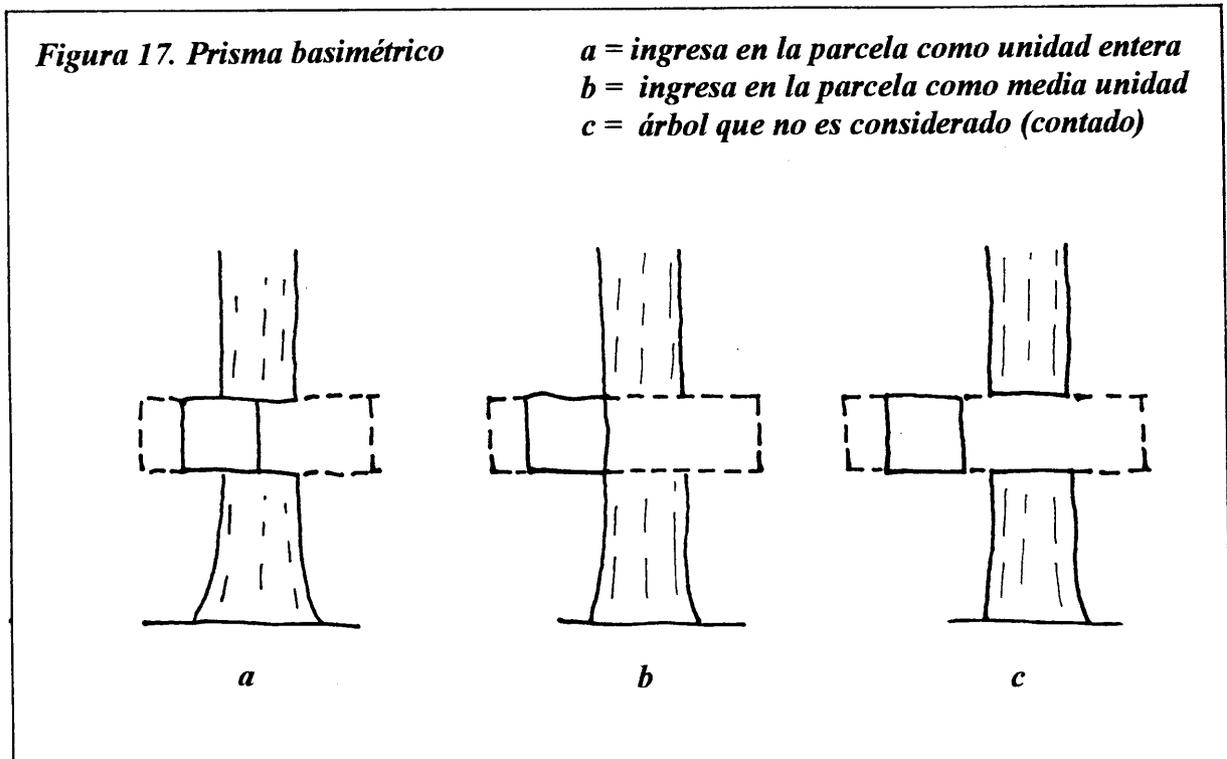
$$di = 2 \text{ raíz de } K$$

$$K = \left(\frac{di}{2} \right)^2$$

y en consecuencia para:

- K = 1 el prisma tendrá 2 raíz de 1 dioptrias = 2,0
- K = 2 el prisma tendrá 2 raíz de 2 dioptrias = 2,83
- K = 3 el prisma tendrá 2 raíz de 3 dioptrias = 3,46
- K = 4 el prisma tendrá 2 raíz de 4 dioptrias = 4,0.

El uso del prisma obedece a los mismos principios de la Prueba de Numeración Angular, de tal forma que el tronco en la altura del DAP observado a través del prisma presentará tres posibles situaciones como se muestra en la Figura N° 17. La reflexión de la luz a través del prisma hace que la parte observada esté con una de las tangentes del árbol aún en la proyección del tronco (a), coincida el lado derecho con el izquierdo (b) o esté totalmente fuera de la proyección del tronco (c).

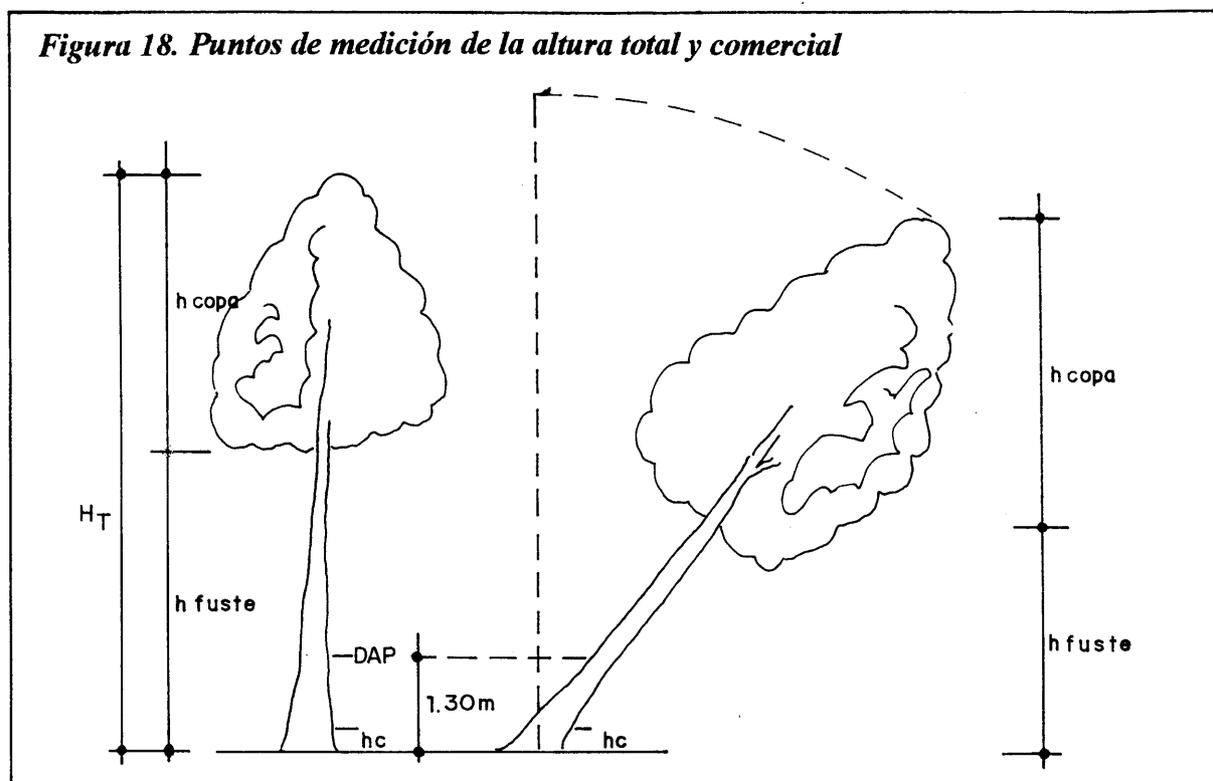


6.4 Altura

La altura es una variable necesaria para estimar principalmente, junto con el DAP el volumen de madera de un árbol, su proceso de crecimiento y el correspondiente incremento volumétrico. También se torna necesaria para la clasificación de sitios.

Dos árboles con el mismo valor de DAP presentarán seguramente alturas diferentes y consecuentemente volúmenes diferentes. Inclusive en esas situaciones existe una correlación aceptable entre las variables DAP, altura y volumen.

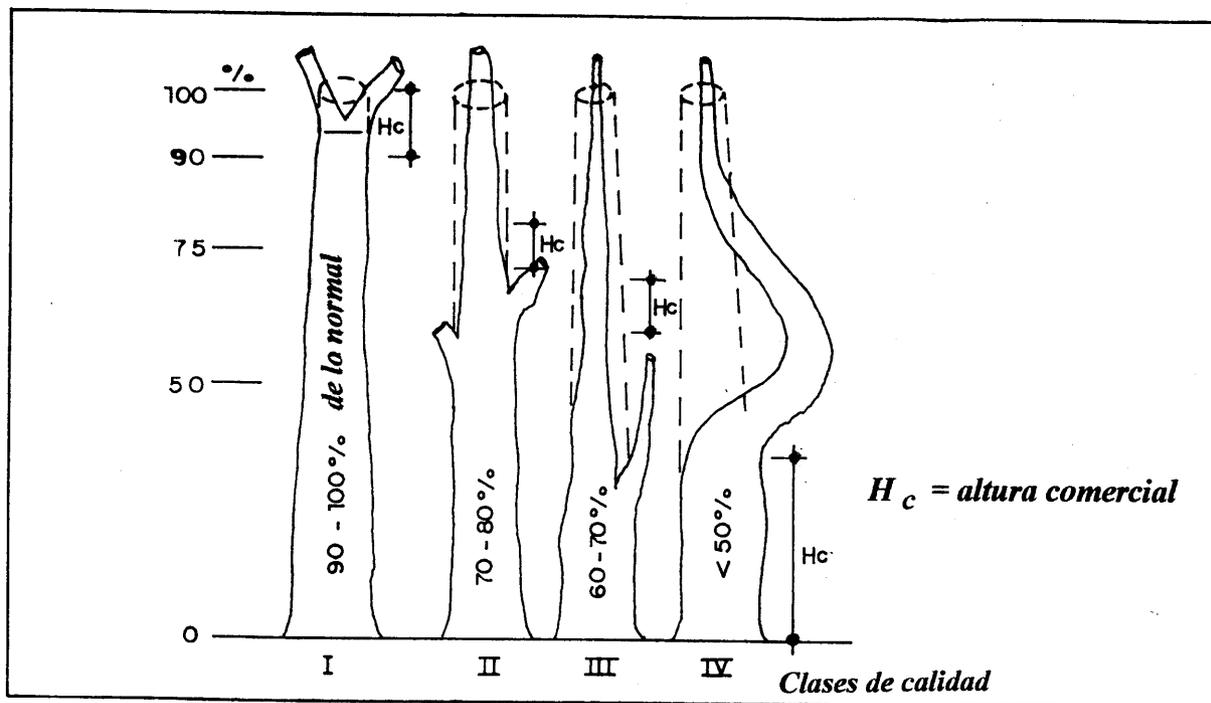
De acuerdo a la parte o sección del árbol que se desee medir se distinguen puntos establecidos en la medición y determinación de la variable altura, conforme se muestra en la Figura N° 18.



En la variable altura los puntos de mayor interés para la dasometría son: la altura total (H_t), altura comercial (H_c), altura del fuste o tronco (h_f) y la altura de corte (h_c). Dependiendo del parámetro dendrométrico a obtenerse existirá necesidad de medir el punto de altura que en su gran mayoría será la altura total y/o comercial.

Realizando trabajos dasométricos en bosques ordenados se determinará casi que exclusivamente la altura comercial y en ese sentido se hará necesario identificar las clases de calidad de la variable altura comercial.

Figura 19. Forma de troncos y puntos de medición de la altura comercial



En términos generales los troncos son clasificados en cuatro clases de calidad como se muestra en la Figura N° 19. Obsérvese el porcentaje de desperdicio aparente que ocurre cuando esos troncos son explotados y comercializados.

Dependiendo de la altura que puedan alcanzar las reglas o miras topográficas y varas graduadas, se podrá determinar la altura del árbol a través de la medición directa. Por supuesto en un árbol apeado para medir su altura se utilizará la cinta métrica.

Cuando el punto de medida de altura se lo deba medir por medio de instrumentos (medición indirecta) se distinguen:

a. los contruidos por principios geométricos (relación de triángulos semejantes) que producen errores de estimación hasta 5% del valor real, y

b. los contruidos por principios trigonométricos. Estos son normalmente instrumentos ópticos basados en la relación de ángulos y de un lado de un triángulo.

6.4.1 Métodos e instrumentos basados en principios geométricos

Métodos e instrumentos que utilizan en su construcción la semejanza de triángulos (conocer un lado y un ángulo en triángulos rectángulos) son fáciles y simples de ser contruidos y usados. Todos ellos no corrigen la inclinación del terreno y precisan

determinar la distancia horizontal (entre el observador y el árbol) usando una cinta métrica.

La literatura registra varios métodos basados en el principio geométrico y solo para citar los más conocidos, se tiene el:

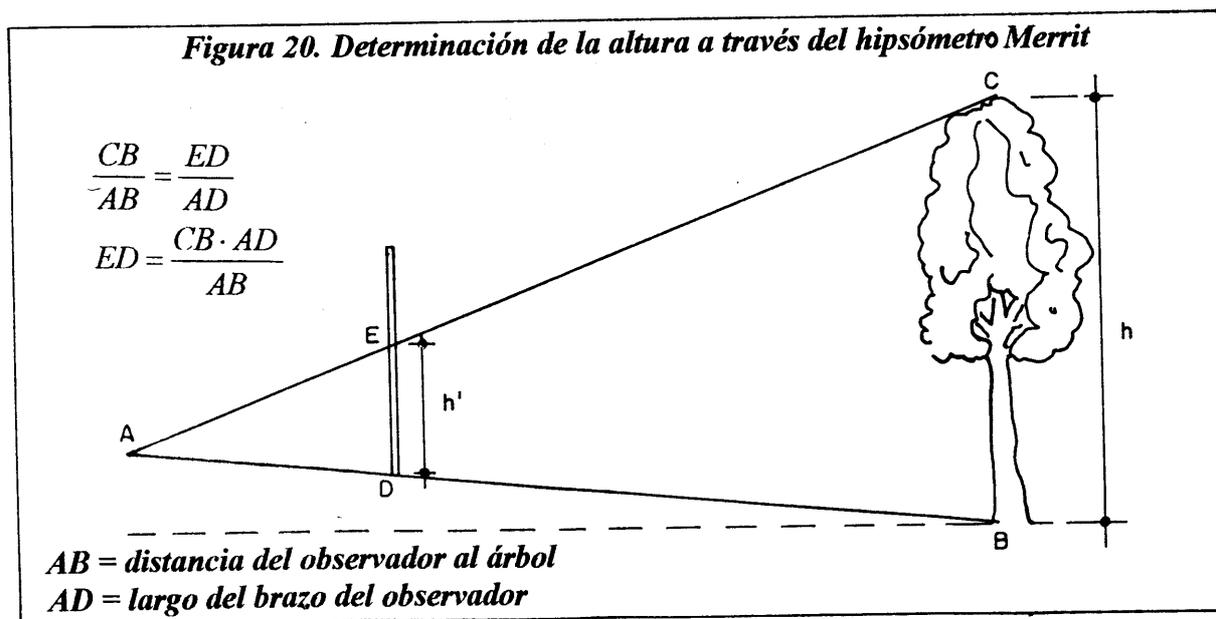
- método de las sombras
- método de la superposición de ángulos iguales
- método de la varilla
- método de las dos balizas.

A los instrumentos que miden la altura se los conoce como hipsómetros. Entre los basados en principio geométrico los más conocidos son: la escuadra de Leduc, la plancheta dendrométrica y los hipsómetros de Klausner, Faustmann, Merrit y Christen.

a. Hipsómetro de Merrit,
instrumento simple en su construcción estando su graduación de acuerdo a las exigencias del observador. El lado opuesto de la Regla de Biltmore puede ser utilizado como hipsómetro de Merrit.

En el mercado norteamericano este hipsómetro está construido para medir la altura de los árboles o del tronco en secciones de 16 pies (4,87 m) manteniendo el instrumento a 26 pulgadas del ojo del observador.

Para la construcción del hipsómetro se podrá emplear la relación de triángulos, de tal forma que la fórmula que permite graduar la regla está definida por simple relación de triángulos iguales (Figura N° 20).



En esta figura la simbología corresponderá a:

AD = largo del brazo del operador
CB = altura del árbol (valor relativo)
AB = distancia al árbol
ED = altura de la graduación en la regla.

Ejercicio N° 8. Se solicita construir un hipsómetro de Merrit con AD = al largo de su brazo.

b. Hipsómetro de Christen

es un instrumento normalmente construido de metal liviano y plegable. El empleo de este hipsómetro requiere de una vara (regla) de altura conocida, que se la apoya al tronco del árbol. Las alturas de estas varas normalmente son de 2 - 4 metros, existiendo en el mercado varas telescópicas hasta de 9 m. La graduación del hipsómetro está en función del tamaño de la vara. Cuanto mayor fuese la altura de la vara existirá mayor precisión en las mediciones. El uso de las varas en bosques densos se torna más difícil e incómoda.

El hipsómetro (regla devidamente graduada) tiene normalmente una altura de 30 cm y su graduación se la realiza de arriba para abajo. La lectura puede ser determinada de cualquier distancia, siempre que el árbol esté encuadrado en el hipsómetro (Figura N° 37 en el Anexo N° 4, página 116). El punto de lectura en el hipsómetro debe coincidir en su visión con el extremo de la vara.

La altura de los árboles bastante altos serán determinados con menor precisión debido a la concentración de unidades en la parte inferior de la regla del hipsómetro.

Ejercicio N° 9. Construcción de un hipsómetro de Christen. Decida la altura de la vara que quedará usar y en función de ella alabarar la graduación correspondiente del hipsómetro.

La fórmula que define la graduación del hipsómetro es:

$$a = \frac{A \cdot h}{L}$$

a = graduación (punto de lectura)
A = altura de la vara
h = altura del instrumento
L = altura del árbol.

Véase un ejemplo de la graduación para la construcción del hipsómetro de Christen, en el Anexo N° 4, página 116.

6.4.2 Instrumentos basados en principios trigonométricos

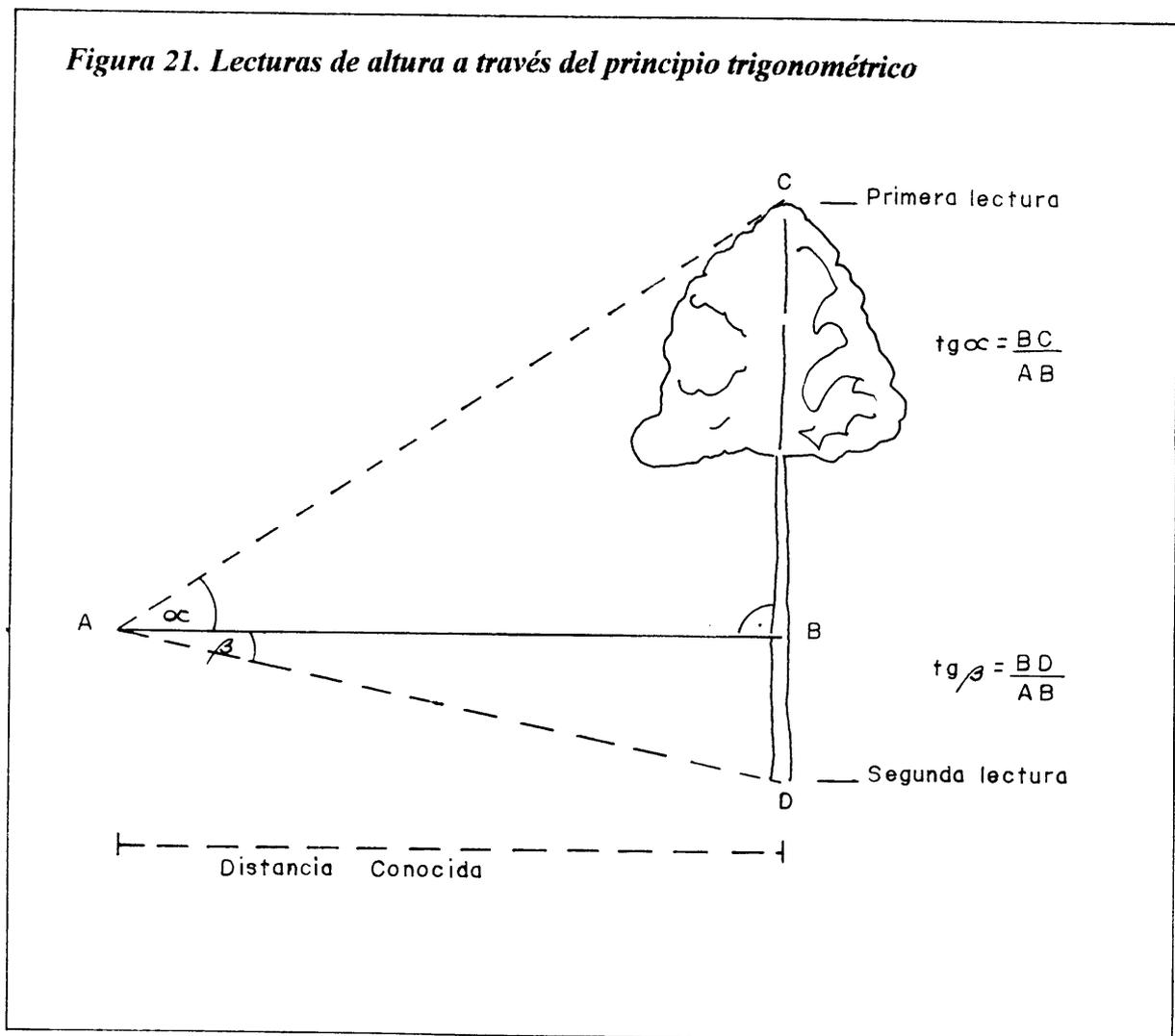
Los instrumentos contruidos en principios trigonométricos se fundamentan en las relaciones angulares de triángulos rectángulos.

Para la determinación de la altura a través de éstos instrumentos se requerirá de dos lecturas, una hacia el ápice y una otra a la base del árbol, desde una distancia horizontal conocida (Figura N° 21). Si AB es la distancia conocida del observador al árbol y BC la altura del árbol a partir del horizonte, su cálculo será:

$$\text{altura} = \text{distancia AB} \cdot \text{tag alfa (de los puntos BC)}$$

y en consecuencia análoga:

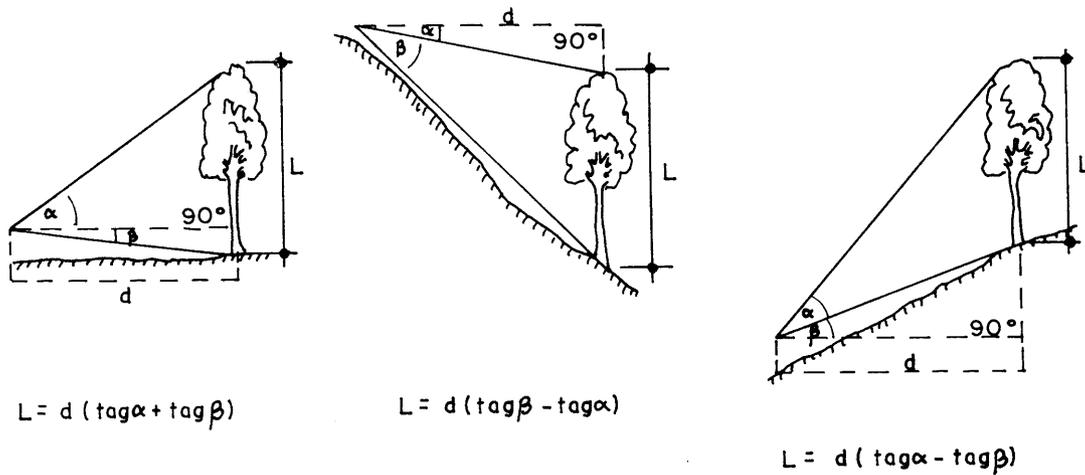
$$\text{altura} = \text{distancia AB} \cdot \text{tag beta (de los puntos BC)}.$$



Dependiendo de la inclinación del terreno y la posición del observador al árbol, existirán apenas tres posibles casos de medición, como se muestra en la Figura N° 22, y la medida del ángulo proporcionará lecturas positivas y negativas de acuerdo a la relación siguiente:

lectura en el árbol	base	ápice	fórmula
negativa	positiva		$L = \text{dist} \cdot (\text{tag alfa} + \text{tg beta})$
negativa	negativa		$L = \text{dist} \cdot (\text{tag alfa} - \text{tg beta})$
positiva	positiva		$L = \text{dist} \cdot (\text{tag alfa} - \text{tg beta})$

Figura 22. Medición de la variable altura empleando instrumentos trigonométricos



Cuando las mediciones son cuidadosamente ejecutadas los resultados obtenidos a través del principio trigonométrico son más precisos de aquellos resultantes por principios geométricos. Otra ventaja consiste en la posibilidad de corrección del efecto de la inclinación del terreno.

Como desventajas se pueden citar:

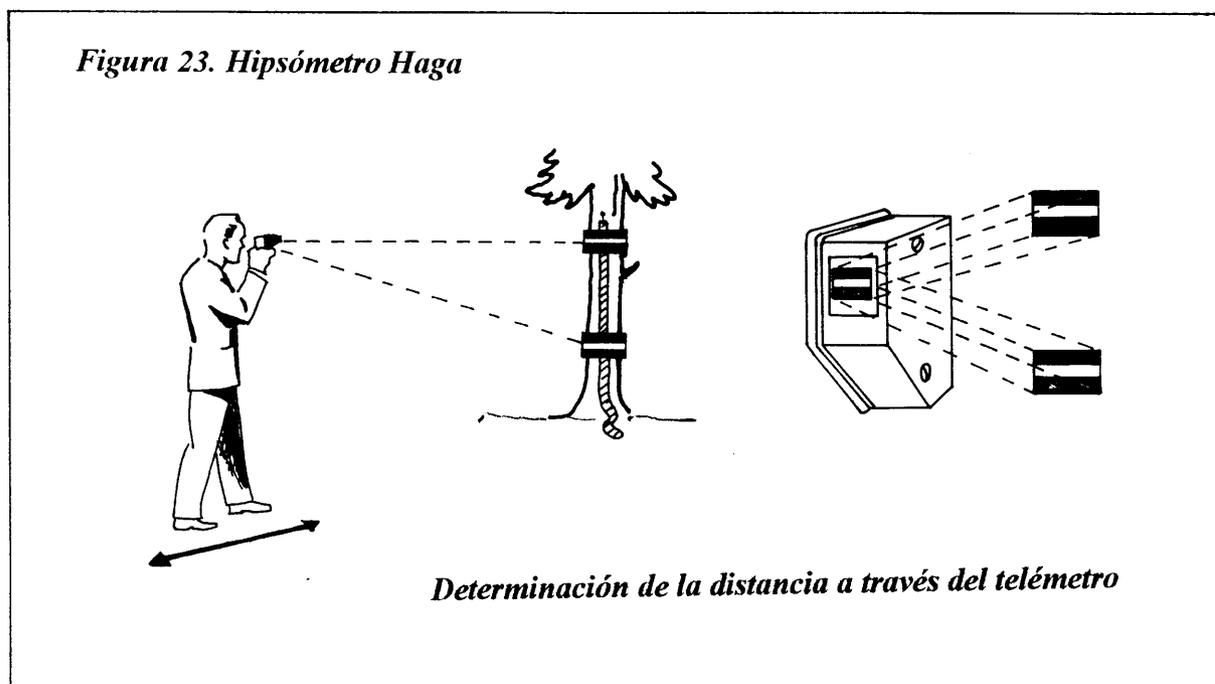
- la necesidad de obtener dos lecturas,
- requiere el conocimiento de la distancia horizontal,
- normalmente son instrumentos ópticos que precisan de luz para su lectura correspondiente,
- son más caros y muchas veces difíciles de obtenerlos debido a su existencia en mercados del exterior.

Entre los instrumentos más conocidos, basados en principios trigonométricos están:

a. Hipsómetro Haga,

instrumento que utiliza un péndulo que por su efecto de gravedad estabiliza la lectura directa correspondiente. Posee escalas graduadas para distancias de 15, 20, 25 y 30 metros así como una escala porcentual (%).

Se recomienda utilizar la escala que corresponda aproximadamente a la altura del árbol a fin de tener mayor precisión en las lecturas de medida. En estos hipsómetros muchas veces están incorporados telémetros que se destinan a la medición de la distancia horizontal, haciendo uso de la escala vertical correspondiente (Figura N° 23).



Para realizar las medidas correspondientes se lo libera primeramente al péndulo. Visando el punto de medida de altura una vez que el péndulo esté estabilizado se lo fija para su lectura correspondiente.

b. Hipsómetro Blume Leiss,
instrumento muy similar al Haga siendo que su diferencia está en la presentación de las escalas de medición de altura.

Su manejo corresponde a la forma similar del Haga. El telémetro que muchas veces está acoplado contiene un filtro que permite una mejor visualización. Tómese atención que las escalas verticales del Haga y del Blume Leiss no son iguales.

c. Relascopio de Bitterlich,
utilizando la banda que se situa a la izquierda corresponderá a la distancia de 20 metros y las bandas localizadas a la derecha de la banda 1 representan las escalas de tangentes para 25 y 30 metros respectivamente (Figura N° 11, página 16).

El efecto de la declividad del terreno está corregido automaticamente, de tal forma que la lectura para la altura obedece a la fórmula:

$$H_c = H_1 - (h_1 \cdot \text{Factor de Declividad})$$

H_c = altura corregida

H_1 = altura leída

h_1 = altura obtenida

desde que el terreno presente inclinaciones mayores a 4° o 7%.

c. Hipsómetro de Weise,
instrumento de forma tubular donde la graduación de la escala para las lecturas de altura se encuentra acoplada lateralmente. Perpendicular a esta escala se localiza una escala de distancia.

La distancia entre el árbol y el observador es determinada por una cinta métrica. La ventaja de éste instrumento está en la posibilidad que ofrece en poder utilizarlo desde cualquier distancia horizontal entre 1 a 40 metros.

d. Clinómetro Suunto,
instrumento óptico que consta de una pequeña caja metálica de aproximadamente 8,0 x 6,5 x 1,5 cm. A través de su ocular se puede leer en su interior dos escalas, una graduada en grados situada a la derecha y la otra en porcentaje (Figura N° 24). Sensiblemente este instrumento de alta precisión está poco difundido en America Latina.

Ejemplo de medición de la altura con el clinómetro Suunto, véase la Figura N° 25.

Fig. 24. Clinómetro Suunto

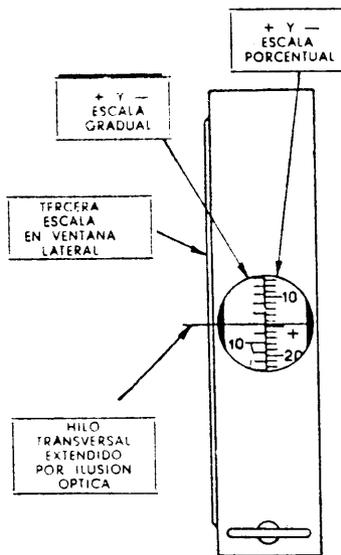
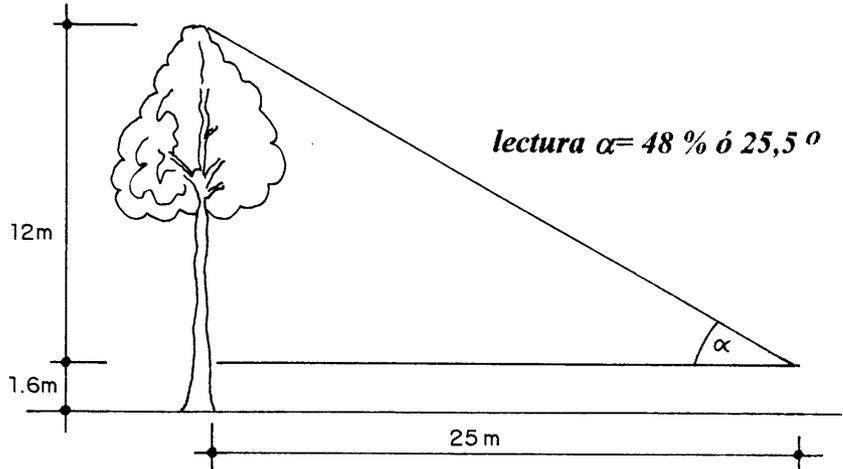


Figura 25. Determinación de altura con el clinómetro Suunto



$$(Lectura/100) \cdot Distancia = H \text{ árbol}$$

$$(48/100) \cdot 25 = 12,5 \text{ m}$$

$$+ 1,6 \text{ m altura del ojo del observador}$$

$$= 13,6 \text{ m altura del árbol}$$

6.4.3 Errores

Cuando se mide la altura de un árbol su precisión no es absoluta. Dependiendo de su finalidad podrá variar más o menos entre un metro y 10 cm de aproximación. Para alcanzar mayor precisión será necesario considerar el factor tiempo y la experiencia de uso del instrumento específico.

Al medir la altura de un árbol en pie se supone que el mismo está perpendicular al suelo, pero esta característica no siempre se presenta (Figura N° 18) y dependiendo del ángulo de visión la altura podrá estar sub o sobreestimada.

Otra fuente de error es la falta de visibilidad del ápice del árbol especialmente en bosques densos. Errores provenientes del propio instrumento, de la distancia del observador al árbol, del balanceo de las copas y de la inclinación de crecimiento acarrear errores sistemáticos (acumulativos) en los cálculos

correspondientes. En la práctica común dasométrica errores hasta de más o menos 10% del valor real de la altura son plenamente aceptables.

Realizando trabajos dasométricos en bosques tropicales naturales se procederá normalmente a determinar la altura comercial y en esos casos la Figura N° 19 muestra los errores que se podrán cometer (página 27).

6.4.4 Relaciones hipsométricas

Los árboles presentan características intrínsecas bien definidas que de alguna forma están relacionadas entre sí. Matemáticamente algunas de las relaciones son posibles de conocerlas y entre ellas la relación hipsométrica se la considera de bastante utilidad para algunas consideraciones dasométricas.

La determinación de la altura de un árbol en función de su DAP en varias circunstancias será la única posibilidad de poder definir el vuelo forestal (estructura vertical del bosque).

La literatura registra una serie bastante compleja de modelos matemáticos para la relación hipsométrica considerando que en las plantaciones de Pinus y Eucalyptus en el Brasil fueron registrados coeficientes de regresión entre 50 y 60% como valores máximos.

Dependiendo de la especie y del sitio será escogida la fórmula matemática más apropiada y entre las más utilizadas están las siguientes:

$$H = b_0 + b_1 / D^2 \quad (\text{Assmann, 1952})$$

$$H = b_0 + b_1 \cdot \log D \quad (\text{Herincksen, 1950})$$

$$\log H = b_0 + b_1 \cdot \log D \quad (\text{Stofells, 1953})$$

$$\log H = b_0 + b_1 / D \quad (\text{Curtis, 1967})$$

$$\ln H = b_0 + b_1 / D^2$$

$$H = b_0 + b_1 / D$$

$$H = b_0 + b_1 D + b_2 D^2$$

6.5 Práctica dendrométrica

De un bosque natural fueron medidos 40 árboles. Los datos de campo fueron los siguientes:

Cuadro N° 3. Datos de campo de 40 árboles

Arb.	DAP	Altura total	Altura comer.	Arb.	DAP	Altura total	Altura comerc.
01	29,2	12,00	4,30	21	42,7	18,00	3,00
02	33,8	16,00	2,75	22	20,9	11,50	5,20
03	32,4	15,30	7,30	23	25,5	13,00	4,00
04	34,5	16,00	4,80	24	13,7	7,50	2,50
05	21,0	15,00	6,20	25	36,7	16,00	3,20
06	16,1	13,00	3,70	26	28,5	13,00	4,00
07	20,2	11,00	4,80	27	40,9	14,00	3,50
08	20,2	11,00	3,40	28	13,5	6,50	2,10
09	22,9	11,00	2,80	29	26,1	15,00	2,50
10	34,9	16,00	3,10	30	21,5	11,70	5,00
11	14,4	8,00	2,75	31	40,7	17,50	3,00
12	31,1	16,00	2,10	32	11,5	9,30	2,40
13	35,6	17,00	4,80	33	12,2	11,00	4,60
14	21,5	10,00	2,70	34	41,2	17,00	2,80
15	22,5	15,00	5,70	35	13,5	8,00	3,00
16	28,8	11,00	3,50	36	31,5	14,50	3,30
17	21,0	11,00	4,20	37	12,5	7,20	2,40
18	22,0	14,50	3,10	38	21,0	11,50	4,90
19	31,0	15,50	3,80	39	26,0	13,00	3,90
20	32,0	12,00	3,60	40	21,0	12,00	4,70

Ejercicio N° 10. Se solicita reordenar los datos completando la tabla con el área basal correspondiente y determinar el árbol central por el:

1. Diámetro medio aritmético
2. DAP de los números reales
3. DAP medio de las clases diamétricas
4. DAP del valor medio de la clase diamétrica
5. Diámetro medio de Hohenald
6. Diámetro medio de Weise
7. D_z
8. Diámetro medio del área basal media
9. Diámetro medio de Lorey
10. DAP medio de la frecuencia del área basal

Interpretar los resultados.

Cuadro N° 4. Reordenación de los datos por orden creciente del DAP

Arb.	DAP	g (m ²)	Arb.	DAP	g (m ²)
32	11,5	0,010387	23	25,5	0,051071
33	12,2	0,011690	39	26,0	0,053093
37	12,5	0,012272	29	26,1	0,053502
28	13,5	0,014314	26	28,5	0,063794
35	13,5	0,014314	16	28,8	0,065144
24	13,7	0,014741	1	29,2	0,066966
11	14,4	0,016286	19	31,0	0,075477
6	16,1	0,020358	12	31,1	0,075964
7	20,2	0,032047	36	31,5	0,077931
8	20,2	0,032047	20	32,0	0,080425
22	20,9	0,034307	3	32,4	0,082448
5	21,0	0,034636	2	33,8	0,089727
17	21,0	0,034636	4	34,5	0,093482
38	21,0	0,034636	10	34,9	0,095662
40	21,0	0,034636	13	35,6	0,099538
14	21,5	0,036305	25	36,7	0,105784
30	21,5	0,036305	31	40,7	0,130100
18	22,0	0,038013	27	40,9	0,131382
15	22,5	0,039761	34	41,2	0,133317
9	22,9	0,041187	21	42,7	0,143201

1. Diámetro medio aritmético:

$$\text{DAP} = 1026,2 / 40 = 25,66 \text{ cm (árbol N}^\circ \text{ 23)}$$

2. DAP medio según los números enteros:

$$\text{DAP} = 1010 / 40 = 25,25 \text{ cm (árbol N}^\circ \text{ 23)}$$

3. DAP medio de las clases diamétricas:

Clase diámetr.	PMC cm	n	Producto	I	Media CD
10 - 15	12,5	7	87,5	I	91,3/7
15 - 20	17,5	1	17,5	I	
20 - 25	22,5	12	270,0	I	255,7/12
25 - 30	27,5	6	165,0	I	164,1/6
30 - 35	32,5	8	260,0	I	261,2/8
35 - 40	37,5	2	75,0	I	72,3/2
40 - 45	42,5	4	170,0	I	165,5/4
Totales		40	1045,0	I	187,98

$$\text{DAP} = 1045 / 40 = 26,13 \text{ cm (árbol N}^\circ \text{ 29)}$$

4. DAP medio por el promedio de la clase diamétrica:

$$\text{DAP} = 187,98 / 7 = 26,85 \text{ cm} \quad (\text{árbol N}^\circ 29)$$

5. Diámetro medio de Hohenald:

$$\text{DAP} = 711,5 / 28 = 25,41 \text{ cm} \quad (\text{árbol N}^\circ 30)$$

6. Diámetro medio de Weise:

$$\text{DAP} = 28,50 \text{ cm} \quad (\text{árbol N}^\circ 26)$$

7. D z (diámetro promedio):

$$\text{DAP} = 31,10 \text{ cm} \quad (\text{árbol N}^\circ 12)$$

8. Diámetro medio de acuerdo a la área basal media:

$$\begin{aligned} \text{Total de g} &= 2,310886 / 40 \\ &= 0,057772 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{DAP} = 27,12 \text{ cm} \quad (\text{árboles N}^\circ 29 \text{ y } 26)$$

9. Diámetro medio de Lorey

Clase	Σ DAP	n	Prod. División
1	107,3	8	13,42
2	333,3	15	22,22
3	278,8	9	30,98
4	141,7	4	35,42
5	165,5	4	41,37
			143,41

$$D_L = 143,41 / 5 = 28,68 \text{ cm} \quad (\text{árboles N}^\circ 16 \text{ y } 26)$$

10. Diámetro medio por la frecuencia del área basal:

Clase	área basal	PMC	n	Producto
1	0,010387 - 0,036950	0,023669	8	0,018935
2	0,036950 - 0,063513	0,050232	15	0,753480
3	0,063513 - 0,090075	0,076794	9	0,691146
4	0,090075 - 0,116638	0,103357	4	0,413428
5	0,116638 - 0,143201	0,129920	4	0,519680
Totales			40	2,567086

$$g \text{ medio} = 2,567086 / 40 = 0,064177 \text{ m}^2$$

$$\text{DAP medio} = 28,5 \text{ cm} \quad (\text{árbol N}^\circ 26)$$

Ejercicio N° 11. En función de los datos del Cuadro N° 3 realizar los siguientes cálculos, ordenando los datos de altura en intervalos de 2 metros:

1. Altura media aritmética
2. Altura media cuadrática
3. Altura media por la frecuencia de la clase de altura
4. Altura media dominante, e número de árboles por estratos:
dominante, intermediario y dominado
5. Altura del árbol con g media
6. Altura media de Weise

Interpretar los resultados.

Solución del Ejercicio N° 11.

1. Altura media aritmética:

$$H \text{ (total)} = 513,5 / 40 = 12,84 \text{ m} \quad (\text{árbol N}^\circ 6)$$

$$H \text{ (com.)} = 149,4 / 40 = 3,74 \text{ m}$$

2. Altura media cuadrática:

$$\begin{aligned} H \text{ (total)} &= \text{raiz de } 6954,31/40 \\ &= \text{raiz de } 173,85775 \\ &= 13,19 \text{ m} \quad (\text{árboles N}^\circ 6, 23, 26, 39) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H \text{ (com.)} &= \text{raiz de } 611,415/40 \\ &= \text{raiz de } 15,285375 \\ &= 3,91 \text{ m} \end{aligned}$$

Cuadro N° 5. Datos de altura total ordenados en orden decreciente y correspondiente valor del área basal

Arb.	Altura total	com.	g m ²	Arb.	Altura total	com.	g m ²
21	18,00	3,00	0,143201	6	13,00	3,70	0,020358
31	17,50	3,00	0,130100	40	12,00	4,70	0,034636
13	17,00	4,80	0,099538	1	12,00	4,30	0,066966
34	17,00	2,80	0,133317	20	12,00	3,60	0,080425
4	16,00	4,80	0,093482	30	11,70	5,00	0,036305
25	16,00	3,20	0,105784	22	11,50	5,20	0,034307
10	16,00	3,10	0,095662	38	11,50	4,90	0,034636
2	16,00	2,75	0,089727	7	11,00	4,80	0,032047
12	16,00	2,10	0,075964	33	11,00	4,60	0,011690
19	15,50	3,80	0,075477	17	11,00	4,20	0,034636
3	15,30	7,30	0,082448	16	11,00	3,50	0,065144
5	15,00	6,20	0,034636	8	11,00	3,40	0,032047
29	15,00	2,50	0,053502	9	11,00	2,80	0,041187
15	15,00	5,70	0,039761	14	10,00	2,70	0,036305
18	14,50	3,10	0,038013	32	9,30	2,40	0,010387
36	14,50	3,30	0,077931	35	8,00	3,00	0,014314
27	14,00	3,50	0,131382	11	8,00	2,75	0,016286
23	13,00	4,00	0,051071	24	7,50	2,50	0,014741
26	13,00	4,00	0,063794	37	7,20	2,40	0,012272
39	13,00	3,90	0,053093	28	6,50	2,10	0,014314

3. Altura media por la frecuencia de la clase de altura (altura total)

CH	PMC	n	Producto	Σ	Media
6 - 8	7	5	35	37,2	7,44
8 - 10	9	2	18	19,3	9,65
10 - 12	11	12	132	136,7	11,39
12 - 14	13	5	65	66,5	13,20
14 - 16	15	12	180	184,8	15,40
16 - 18	17	4	68	69,5	17,38
Totales	72	40	498		

$$H = 498 / 40 = 12,45 \text{ m} \quad (\text{árboles N}^\circ 1, 20 \text{ y } 40)$$

Altura media por el PMC:

$$H = 72 / 6 = 12 \text{ m} \quad (\text{árboles N}^\circ 1, 20 \text{ y } 40)$$

4. Altura media dominante:

Estrato	Intervalo	n	Media
Dominante	14,30 - 18,10	16	15,89
Intermediario	10,40 - 14,20	17	11,92
Dominado	6,50 - 10,30	7	8,07

5. Altura media del árbol con el área basal medio

$$g = 0,05772 \text{ m}^2$$
$$\text{DAP} = 27,12 \text{ cm}$$
$$H = (\text{entre } 13 \text{ e } 15 \text{ m}) = 14 \text{ m} \quad (\text{árboles N}^\circ 26 \text{ y } 29)$$

6. Altura media de Weise

$$H = 16 \text{ m} \quad (\text{árboles N}^\circ 2, 4, 10, 12 \text{ y } 25)$$

Ejercicio N° 12. Analisando los dos ejercicios anteriores identifique el árbol central de esa población y dé sus conclusiones.

6.6 Factor de forma

En un bosque natural o en una plantación se observa que existe naturalmente una variación grande en las formas de los troncos, variación que está en función de sus diámetros, de la base al ápice del árbol. Esta disminución de diámetros en el mismo tronco se conoce en la literatura como "taper" o adelgazamiento que es la razón fundamental en la variación del volumen del árbol que varia principalmente de acuerdo con la especie, edad y condiciones de sitio.

Para calcular el volumen de un árbol con bastante precisión se hace necesario su apeo y cubicación rigurosa. Esta situación no siempre es posible. Estudios demuestran que es posible estimar con precisión el volumen de un árbol en su medio natural sin necesidad de que estos sean cortados. Para tal efecto el Relascopio y el Telereleopio de Bitterlich permiten obtener resultados dignos de confianza.

La forma del árbol se torna en consecuencia una importante variable para determinar su volumen geométrico. Para su determinación se busca la relación del volumen del árbol con el volumen de algún sólido geométrico o entre dos diámetros en el mismo tronco.

6.6.1 Factor volumétrico de forma (f)

$$f = \frac{\text{volumen del árbol}}{\text{vol. sólido geométrico}}$$

también conocido como factor de forma (FF) o coeficiente mórfico (CM).

La fórmula tradicional para determinar el volumen de madera de un árbol es:

$$V = AB \cdot H \cdot f$$

de tal forma que:

$$f = \frac{\text{Vol. árbol}}{AB \cdot H} \quad (**)$$

siendo que el denominador corresponde a la fórmula del volumen de un cilindro de base igual al diámetro del DAP.

Dependiendo donde se considere para el cálculo correspondiente la área transversal y la altura, se distinguen para el tronco los siguientes factores:

factor	área transversal	altura
absoluto	a nivel del suelo	total
normal	a 5 o 10% de H_{total}	total
comercial	a nivel del DAP	comercial
a altura del DAP	a nivel del DAP	total

6.6.2 Factor diamétrico de forma (CF)

$$CF = \frac{\text{Diámetro arbitrario}}{\text{DAP}}$$

llamado también como coeficiente de forma.

De la fórmula anteriormente tratada (**) se desprende la siguiente relación:

$$f = \frac{D_i^2 \cdot (\pi/4) \cdot H}{\text{DAP}^2 \cdot (\pi/4) \cdot H} = \frac{D_i^2}{\text{DAP}^2}$$

$$D_i / DAP = \text{raiz de } f$$

$$CF = \text{raiz de } f$$

$$CF^2 = f$$

en ese principio se conoce entre los más usados el:

CF normal, donde el D_i se toma a $H/2$ del árbol o de la sección correspondiente

CF absoluto, D_i a $H/2$ descontando 1,30m de H .

Ejercicio N°13. Cálculo del coeficiente de forma

Dos árboles de *Eucalyptus grandis* fueron apeados y cubricados en secciones de un metro con precisión de 5 cm a lo largo del tronco, cuyos datos se muestran en el Cuadro N° 6. Sus medidas en pie fueron :

	DAP (cm)	H (m)
Arbol N° 1	20,0	20,0
Arbol N° 2	11,0	15,0

Cuadro 6. Cubicación rigurosa

Diámetro	Arb.1	Arb.2
D0	26,0	13,0
D1	21,0	11,5
D2	20,0	10,5
D3	18,0	9,5
D4	17,5	9,0
D5	16,5	8,0
D6	15,5	7,5
D7	15,0	7,0
D8	14,5	6,5
D9	13,0	6,0
D10	12,5	5,5
D11	12,0	5,0
D12	11,5	3,5
D13	10,5	3,0
D14	9,5	2,5
D15	8,0	
D16	6,5	
D17	5,0	
D18	4,5	
D19	4,0	

Se solicita: a). determinar el coeficiente de forma y el factor de forma de ambos árboles.
b). Dar conclusiones.

Cuadro 7. Cálculo del coeficiente de forma

PM	Arbol N° 1			Arbol N° 2		
	Diám.	g (cm ²)	CF	Diám.	g (cm ²)	CF
D0	26,0	530,93	1,30	13,0	132,73	1,18
D1	21,0	346,36	1,05	11,5	103,87	1,04
D2	20,0	314,16	1,00	10,5	86,59	0,95
D3	18,0	254,47	0,90	9,5	70,88	0,86
D4	17,5	226,98	0,88	9,0	63,62	0,82
D5	16,5	213,82	0,83	8,0	50,27	0,73
D6	15,5	188,69	0,78	7,5	44,18	0,68
D7	15,0	176,71	0,75	7,0	38,48	0,64
D8	14,5	165,13	0,73	6,5	33,18	0,59
D9	13,0	132,73	0,65	6,0	28,27	0,55
D10	12,5	122,72	0,63	5,5	23,76	0,50
D11	12,0	113,10	0,60	5,0	19,63	0,45
D12	11,5	103,87	0,58	3,5	9,62	0,32
D13	10,5	86,59	0,53	3,0	7,07	0,27
D14	9,5	70,88	0,48	2,5	4,10	0,23
D15	8,0	50,27	0,40			
D16	6,5	33,18	0,33			
D17	5,0	19,63	0,25			
D18	4,5	15,90	0,23			
D19	4,0	12,57	0,20			

PM = punto de medida

En consecuencia el coeficiente de forma (CF) será:

$$\text{del árbol N° 1} = 13,10/20 = 0,655 = 0,6$$

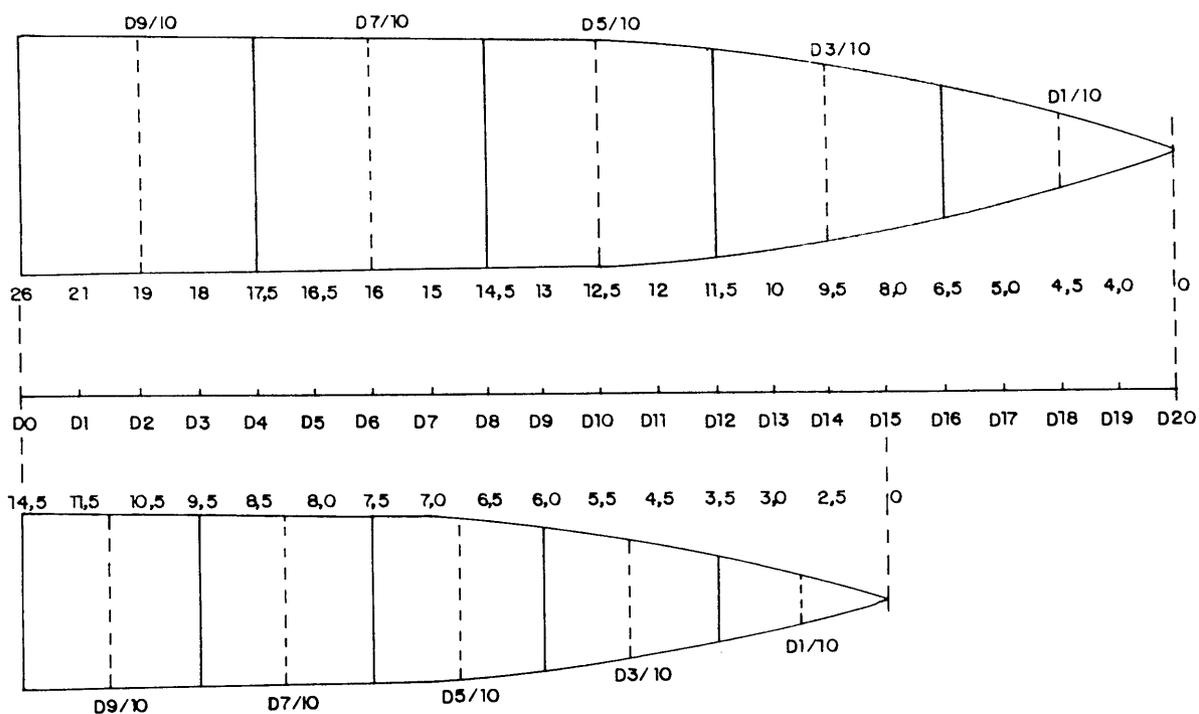
$$\text{del árbol N° 2} = 9,81/15 = 0,654 = 0,6$$

El factor de forma normal (natural) cuantitativamente es el más eficiente en la descripción de la forma actual del árbol. Árboles de la misma forma geométrica podrán tener el mismo factor de forma presentando variaciones en la altura de los mismos. Para el cálculo de este factor recomiéndase adoptar el método de Hohenald que consiste en dividir el árbol en cinco partes (secciones) iguales (Figura N° 26) y medir el diámetro medio de la sección correspondiente.

Cuadro 8. Coeficiente de forma normal de Hohenald

	árbol N° 1	CF	árbol N° 2	CF
$N_9 = D_{(9/10)}/D_9$	20,00/20 = 1,00		11,00/11 = 1,00	
$N_7 = D_{(7/10)}/D_9$	15,50/20 = 0,77		8,50/11 = 0,77	
$N_5 = D_{(5/10)}/D_9$	12,50/20 = 0,62		6,75/11 = 0,61	
$N_3 = D_{(3/10)}/D_9$	9,50/20 = 0,47		5,25/11 = 0,47	
$N_1 = D_{(1/10)}/D_9$	4,50/20 = 0,22		2,75/11 = 0,25	

Figura 26. Cubicación por el método Hohenald



Consecuentemente se puede asegurar que ambos árboles pertenecen al mismo reflorestamiento y el factor de forma correspondiente será:

$$f = 0,2 (1 + N_7 + N_5 + N_3 + N_1)$$

$$f = 0,2 (1 + 0,77 + 0,62 + 0,47 + 0,22)$$

$$f = 0,449$$

raiz de $f = CF$

$$CF = 0,67$$

Una vez que el DAP/D_{0,9} esta definido como cociente de Hohenald, existiendo coincidencia de f_{0,9} a la altura del DAP, se torna el factor de Hohenald igual al factor común.

Cuadro 9. Volumen de las secciones en m³
 $Smalian = (A_1 + A_2)/2 \cdot H$

Sección	Arbol N° 1	Arbol N° 2
1	0,0438645	0,0118300
2	0,0330260	0,0095230
3	0,0284315	0,0078735
4	0,0240725	0,0067250
5	0,0220400	0,0056945
6	0,0201255	0,0047225
7	0,0182700	0,0041330
8	0,0170920	0,0035830
9	0,0148930	0,0030725
10	0,0127725	0,0026015
11	0,0117910	0,0021695
12	0,0108485	0,0014625
13	0,0095230	0,0008345
14	0,0078735	0,0005585
15	0,0060575	
16	0,0041725	
17	0,0026405	
18	0,0017765	
19	0,0014235	

Volumen de madera en metros cúbicos:

$$\text{árbol N}^\circ 1 = 0,2906940 \text{ m}^3$$

$$\text{árbol N}^\circ 2 = 0,0647835 \text{ m}^3$$

$$f = \frac{\text{vol. árbol}}{\text{Vol. cilindro}}$$

Arbol N° 1:

$$0,290694 \text{ m}^3 / 0,62832 \text{ m}^3 = 0,4626$$

$$\text{raiz de } 0,4626 = CF = 0,68$$

Arbol N° 2:

$$0,0647835 \text{ m}^3 / 0,1425495 \text{ m}^3 = 0,454621$$

$$\text{raiz de } 0,454621 = CF = 0,67$$

II. VOLUMETRIA

Para determinar el volumen de un rodal o macizo forestal se requerirá conocer principalmente el volumen total del árbol (madera + corteza + ramas), volumen del tronco, volumen de la corteza y volumen de las ramas. Dependiendo de la finalidad del producto que se mide se tendrá el correspondiente volumen comercial o biomasa total.

En el día a día de la mensuración forestal se exige conocer el volumen exacto o determinar el volumen aproximado del árbol. El volumen exacto se lo podrá obtener por el principio de Arquímedes o por la cubicación rigurosa.

1. Fórmulas

Tomando en cuenta que el árbol será considerado como un sólido semejante a un prototipo o cuerpo geométrico (Figura N° 27), las siguientes fórmulas geométricas serán utilizadas en la determinación del volumen de madera:

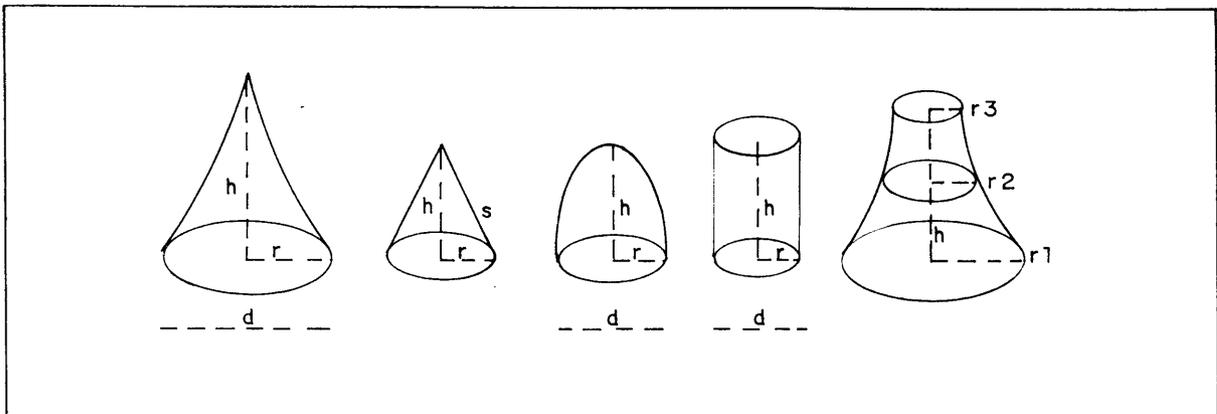
cilindro: $V = H \cdot A_1$

paraboloide: $V = H \cdot \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right)$

neiloide: $V = H \cdot \left(\frac{A_1 + 4A' + A_2}{6} \right)$

cono: $V = H \cdot \left(\frac{A_1 + A_2 + \text{raiz de } A_1 - A_2}{3} \right)$

Figura 27. Figuras geométricas



Entre las fórmulas más conocidas y que ofrecen mayor precisión estan la de:

a. Smalian

$$V = \frac{(A_1 + A_2)}{2} \cdot h$$

que se aconseja emplearla cuando el tronco o sección tenga una forma semejante a un paraboloido cilíndrico o truncado.

b. Huber

$$V = A' \cdot h$$

para ser usada en condiciones similares a la de Smalian.

c. Newton

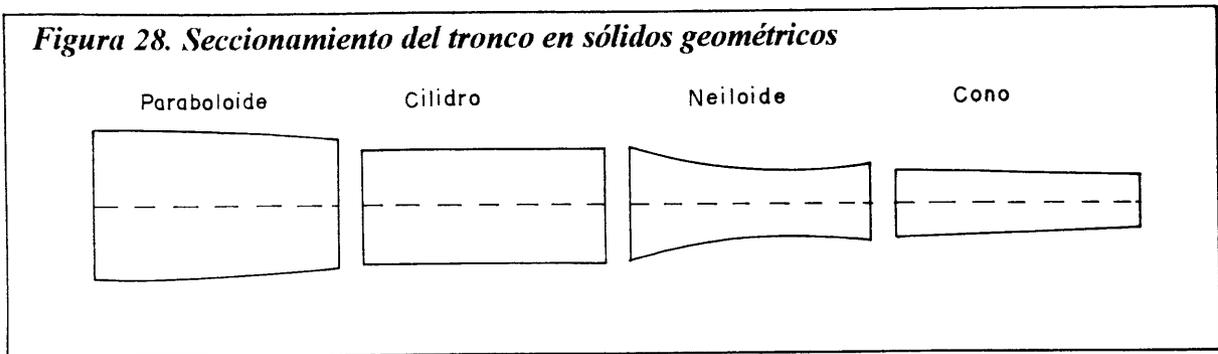
$$V = \frac{(A_1 + 4A' + A_2)}{6} \cdot h$$

a ser utilizada cuando el tronco presenta una forma neiloide truncado. Normalmente la primera sección del tronco, aquella cerca del suelo y el propio tocón presentará esta forma geométrica. La fórmula de Newton es la que proporciona mejores resultados y en la práctica es la menos usada debido a que sus cálculos son más complejos y demorados.

La literatura demuestra que las fórmulas de Smalian y de Huber comparadas con los volúmenes obtenidos por el método del xylómetro (principio de Arquimedes) producen errores pequeños. La fórmula de Huber subestima resultados entre -1 y -2% y la fórmula de Smalian sobreestima sus valores en aproximadamente 2% en función del largo del tronco.

En la realidad los troncos de los árboles nunca se identifican con un único sólido geométrico, ocurriendo con frecuencia que en un mismo tronco se presentan varias secciones con semejanza próxima a los varios protótipos geométricos (Figura N° 28 y Cuadro N° 8) con marcante grado de transición a lo largo del tronco, por supuesto sin que fuese posible identificar los límites de esa transición. Consecuentemente se podrá afirmar que cuanto menor fuese el largo (altura) de la sección, mayor precisión se obtendrá en la determinación del volumen correspondiente.

Figura 28. Seccionamiento del tronco en sólidos geométricos



Las fórmulas mencionadas serán normalmente utilizadas en árboles apeados (cortados), ofreciendo en consecuencia mayor precisión en sus resultados. Cuando la última sección (ápice del tronco) fuese menor al largo de las secciones con que se trabaja, esta debe ser medida con la forma del cono.

d. Hohenald

$$V = \Sigma V_i$$

$$V_1 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

utilizando esta fórmula, el tronco debe ser dividido en cinco partes iguales. En cada sección será medido su volumen haciendo uso de la fórmula de Huber.

e. FAO

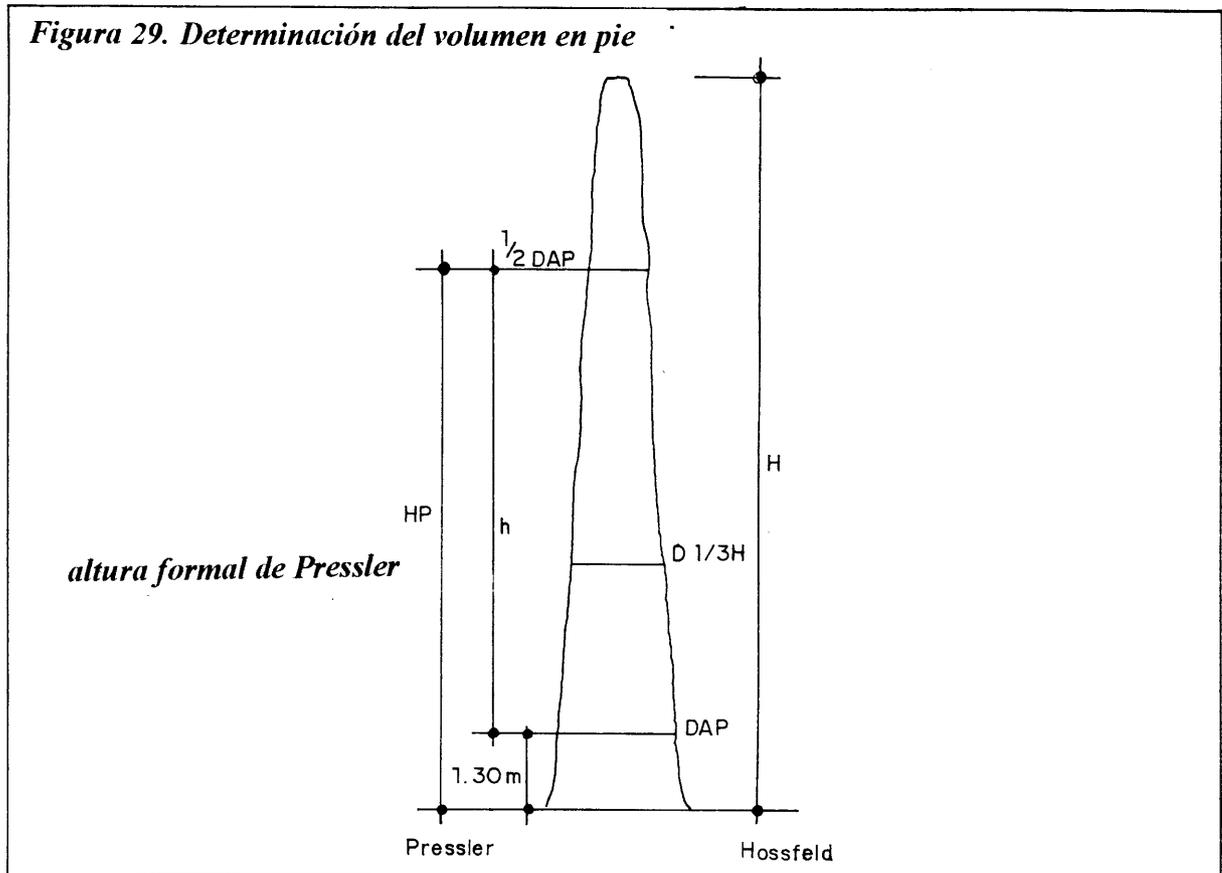
$$V = 0,2 h \left(\frac{2g_1 + g_2 + g_3}{4} + g_{0,7} + g_{0,5} + g_{0,3} + g_{0,1} \right)$$

- g_1 = área transversal a 1/6 de h de la primera sección
- g_2 = área transversal a 3/6 de h de la primera sección
- g_3 = área transversal a 5/6 de h de la primera sección

Esta fórmula se fundamenta en el mismo principio de Hohenald siendo que la primera sección esta subdividida en tres subsecciones y la primera subsección es contada dos veces.

Trabajando en plantaciones y en rodales mas o menos homogéneos el uso del Relascopio de Espejo se torna una herramienta muy eficaz cuando se pretende conocer el volumen en pie y con alto grado de precisión, haciendo uso de las siguientes fórmulas:

Figura 29. Determinación del volumen en pie



Pressler

$$\text{Vol.} = \frac{2A \cdot h'}{3}$$

h' es la altura entre el DAP y el punto donde el diámetro es la mitad del DAP (ver Figura N° 29)
 A corresponde al área basal

Esta fórmula será usada en árboles que tuvieran la forma semejante a un paraboloides ordinario o un cono.

Hossfeld

$$\text{Vol.} = \frac{3A''}{4} \cdot H$$

A'' = área transversal tomada a 1/3 de H
 H = altura total (ver Figura N° 29).

2. Cubicación Rigorosa

Se entiende por cubicación rigurosa el procedimiento de medir diámetros equidistantes a lo largo del tronco. Generalmente la distancia utilizada es de 2 metros. A partir de este criterio los siguientes métodos pueden ser seguidos para la obtención del volumen real.

2.1 Cubicación analítica

El resultado del cálculo del volumen se lo puede obtener empleando una de la fórmulas anteriormente tratadas.

Las fórmulas de Smalian y de Huber son las más usuales debido principalmente a su simplicidad en las operaciones matemáticas fuera de que se las puede organizar en un formulario apropiado donde el volumen es calculado por simple adición sucesiva de la transformación de las áreas transversales correspondientes.

La utilización de la fórmula de Newton que también proporciona alto grado de precisión exige cálculos más cuidadosos y demorados.

Oettel en Alemania a mitad del siglo XVIII posiblemente fué el primero en calcular el volumen de una infinidad de árboles por medio de fórmulas matemáticas.

2.2 Cubicación gráfica

El método de cubicación gráfica fué desarrollado en Alemania por Reineke en 1926.

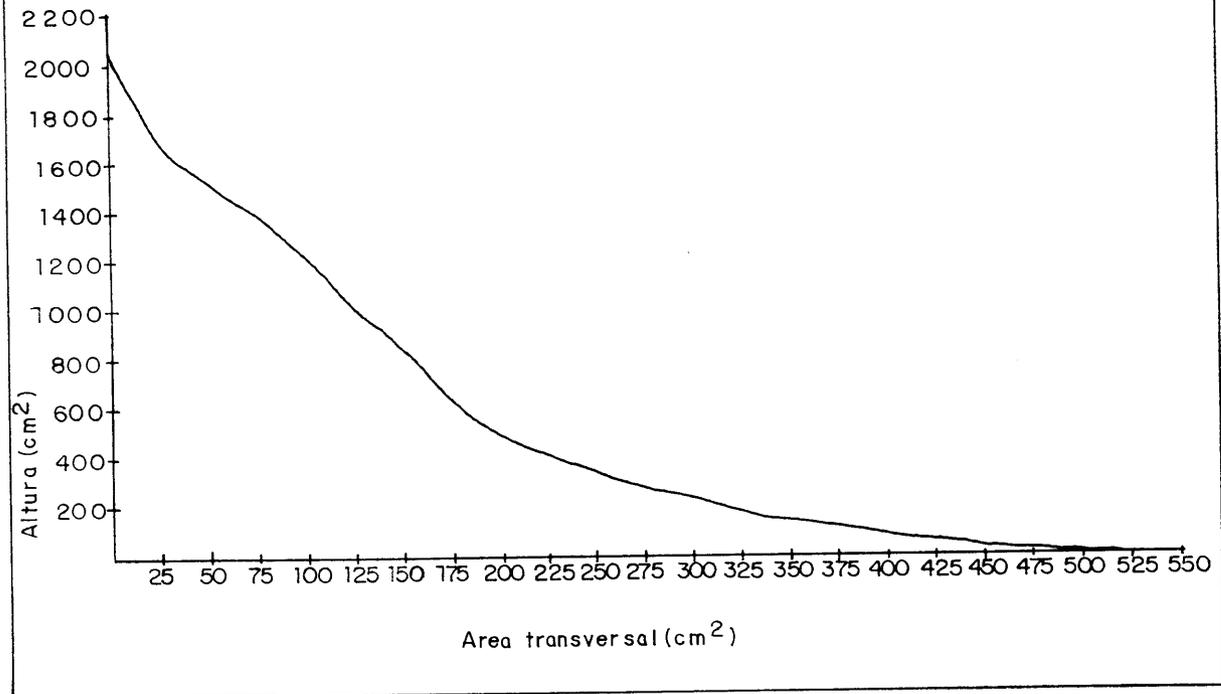
El volumen se lo obtiene mediante un trazado del perfil longitudinal del tronco utilizando papeles propios para esta finalidad. La ventaja de este método está en que se puede cubicar cualquier tipo de árbol, tenga o no alguna semejanza con los protótipos dendrométricos. Este método utiliza ejes cartesianos de tal forma que en el eje de las ordenadas se colocan los valores de alturas y en la absisa sus respectivas áreas transversales.

El volumen es calculado a través de un planímetro. El árbol N° 1 del Cuadro N° 7 está demostrado en la Figura N° 30.

Correspondiendo a la figura anteriormente citada, si 1 cm en el eje de alturas equivale a 200 cm y a 25 cm cuadrados en la absisa, el factor de corrección será:

$$\begin{aligned}f &= 200 \text{ cm} \cdot 25 \text{ cm}^2 \\f &= 2,0 \text{ m} \cdot 0,0025 \text{ m}^2 \\f &= 0,05\end{aligned}$$

Figura 30. Cubicación gráfica



y el volumen correspondiente del árbol N° 1 del Cuadro N° 7 será:

$$\begin{aligned} V &= s \cdot f \\ V &= 5,835 \cdot 0,05 \\ V &= 0,29175 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Las limitaciones del método de la cubicación gráfica reside en la lentitud de la lectura del planímetro y la exigencia de un gráfico para cada árbol lo que se torna impracticable con un número grande de árboles apeados o cubicados. Otra desventaja del método gráfico está en la dificultad de armonizar las curvas para cada clase diamétrica y de altura, en vista del exesivo número de árboles requeridos.

De cualquier forma, la finalidad de la cubicación rigurosa se justifica en la obtención de datos (resultados de volúmenes) reales lo que permitirá la elaboración de las tablas de volúmenes. Si el número de individuos que serán cubicados fuese grande no existirá diferencia significativa entre ambos métodos (gráfico y analítico).

Ejercicio N° 14. Cálculo de cubicación rigurosa

PM (m)	Especie: Eucalyptus grandis								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.3	26.2	24.3	18.5	22.0	13.0	15.5	20.0	20.0	23.0
1.3	23.0	20.0	15.0	17.0	10.0	12.0	17.0	16.0	20.5
2.3	21.8	18.6	14.5	16.5	9.5	11.3	16.0	15.5	19.8
3.3	20.4	18.1	14.0	16.0	9.0	10.6	15.0	15.2	18.1
4.3	19.7	17.5	13.5	15.8	8.5	10.1	14.0	14.7	17.3
5.3	18.3	17.0	13.0	15.1	8.0	9.5	13.5	14.1	16.2
6.3	17.6	16.6	12.5	14.6	7.5	9.0	13.0	13.3	15.1
7.3	17.1	16.0	12.1	14.1	7.1	8.8	12.0	12.4	14.1
8.3	16.8	15.6	11.6	13.6	6.4	8.3	11.3	11.3	13.4
9.3	16.2	15.1	11.0	13.2	5.8	7.8	10.5	10.6	12.4
10.3	15.5	13.9	10.5	12.8	5.2	7.0	10.0	8.4	11.8
11.3	15.0	13.3	10.0	12.3	4.7	6.6	9.0	7.0	10.5
12.5	14.7	12.5	9.0	11.5	4.1	6.2	8.5	6.2	7.5
13.3	14.1	9.0	8.5	11.0	3.5	5.7	6.0	4.7	6.8
14.3	12.8	8.5	7.0	10.4	3.0	5.0	5.0	3.5	3.9
15.3	11.5	8.0	5.5	9.2		4.0	4.0		
16.3	9.9	6.4	4.7	8.0		3.5			
17.3	9.1	5.3	3.0	6.3					
18.3	8.2	3.4		5.0					
19.3	6.3	2.5		4.0					
20.3	5.1								
21.3	3.5								

- Se solicita: a). Calcular el volumen de madera de las nueve troncas, empleando la fórmula de Smalian.
 b). Cuál será el valor del volumen de madera de las troncas calculado a través de la fórmula de Huber?
 c). Calcular el factor de forma.
 d). Interpretar los resultados.

Resultados parciales del ejercicio N° 14 véase en el Anexo N° 5 (página 117).

3. Tablas de volumen

Entiéndase por tabla de volumen a la ecuación o a la relación gráfica o numérica que permite determinar el volumen total o parcial de un árbol en función de determinadas variables independientes. Las tablas de volumen pueden ser clasificadas de acuerdo al volumen que trata de estimar, así se podrá tener tablas para volúmenes totales, volumen aprovechable, volumen sin corteza, volumen comercial, etc. Estas tablas pueden ser construidas por procesos analíticos o gráficos.

Las tablas de volumen son construidas para estimar los volúmenes de madera existentes en determinados rodales o macizos forestales. Para su debida construcción se hace necesario la medición real (cubicación rigurosa) de un número elevado de árboles a fin de que las tablas y curvas tengan alto grado de validez en sus interpretaciones.

Con el desarrollo de las técnicas de regresión muchas de las desventajas de la cubicación rigurosa fueron desapareciendo. La técnica de regresión presenta la ventaja de ser enteramente objetiva una vez que las interrelaciones entre variables dependientes e independientes son predeterminadas.

El procedimiento aplicado a datos básicos obliga el ajuste de una curva, de tal forma que la suma de los cuadrados de los desvíos entre los volúmenes reales y los estimados por la línea de regresión sea minimizada. Métodos utilizando cálculos de regresión tienen como objetivo principal la ventaja de eliminar los errores personales causados en los ajustes de curvas. Con la aplicación de la ciencia de la computación e informática y el creciente uso de métodos estadísticos, la técnica de regresión a través del cálculo de los mínimos cuadrados superó toda posible incógnita que aún existía.

El empleo de las tablas de volumen es bastante amplio, desde la cubicación simple de pocos árboles en pie hasta la determinación específica de la madera aprovechable.

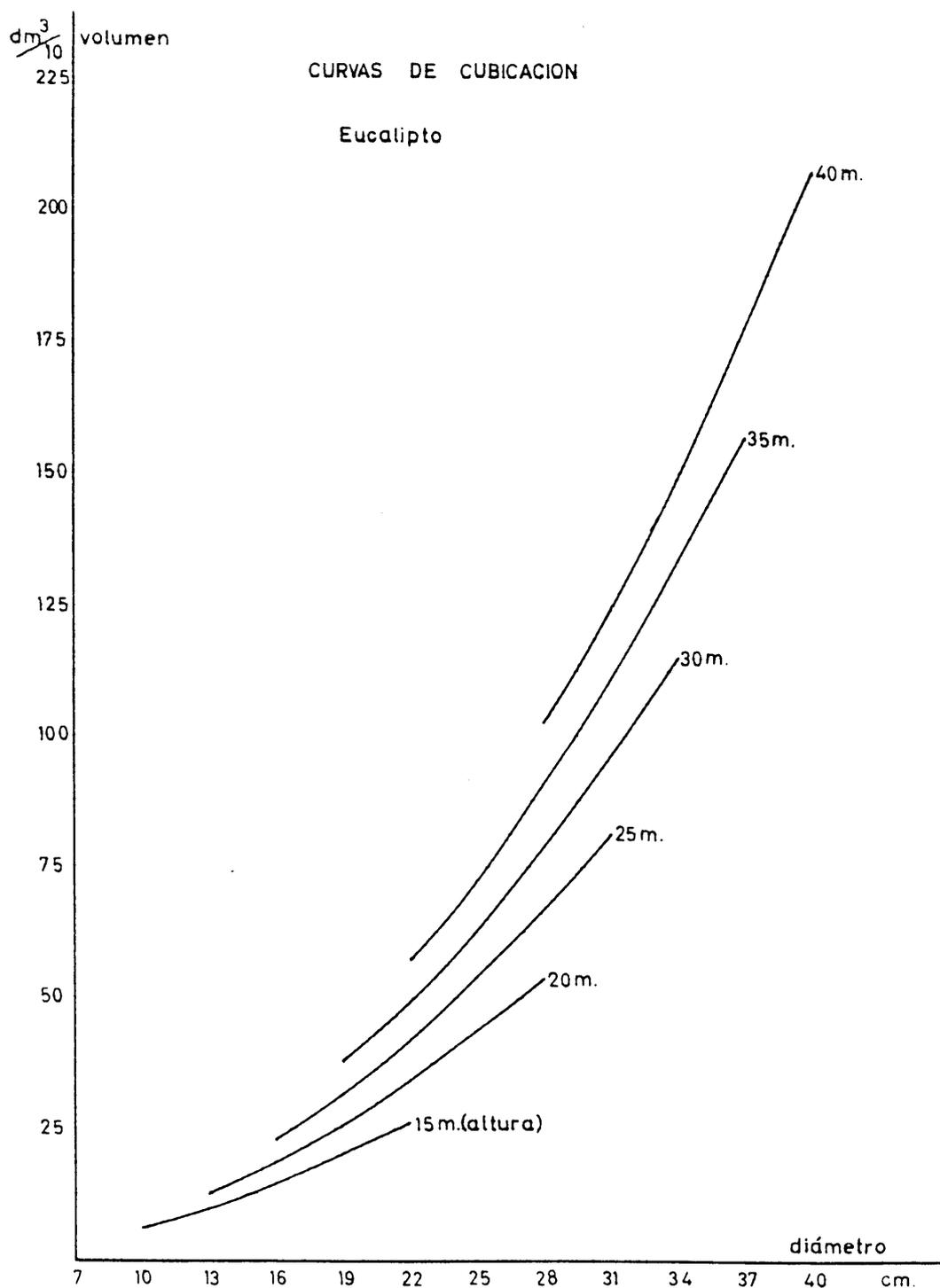
Estas tablas son construidas para que puedan ser usadas con una simple variable dendrométrica o combinación de dos o tres variables:

a. Cuando únicamente el DAP es utilizado en la determinación del volumen, las tablas correspondientes son denominadas de Tablas de Volumen Local, Tablas de Tarifa o tablas de una entrada. Estas tablas son de pequeña exactitud porque asume que los árboles con el mismo valor de DAP tengan la misma altura media y estén en una misma clase de forma. El uso de éstas tablas se las recomienda en macizos forestales donde la relación hipsométrica es casi una constante.

b. Estando las tablas construidas para uso del DAP y la altura del árbol, a éstas se las denomina de Tablas Estandar, tablas regionales o tablas de dos entradas (Figura N° 31 y Cuadro N° 10). Para su construcción, la selección de los árboles que serán cubificados son normalmente escogidos aleatoriamente, considerando todas las clases diamétricas y el cálculo de volumen se lo efectúa por una fórmula escogida previamente.

Una tabla local (de una entrada) puede ser facilmente derivada de una tabla regional desde que se establezca una relación hipsométrica y se la interpole en la tabla correspondiente el volumen del árbol con altura media para cada clase diamétrica.

Figura 31. Curvas de cubicación



c. También podrán existir tablas de tres entradas donde el factor de forma podrá ser la tercera variable independiente. Estas tablas son conocidas como Tablas de Volumen Formal. Para muchos autores introducir una tercera variable significaría en aumentar la precisión de las estimativas del volumen pero por otra parte introducir una variable en la ecuación de volumen complica bastante su cálculo y no siempre el aumento de la precisión es significativo. Si el proceso de medición se lo realiza por medio de la cubicación rigurosa y cuanto menor las secciones fuesen, la forma del árbol indirectamente estaría siendo considerada.

Una tabla de volumen formal hace uso de una única clase de forma, lo que podrá llevar a errores cuando los árboles no corresponden a la misma forma. Se concluye por tanto que la tablas regionales que trabajan con las variables DAP y altura son tan precisas y satisfactorias como las tablas de volumen formales.

3.1 Ecuaciones volumétricas

En la dasometria práctica lo más usual es el de elaborar tablas de volúmenes en base de ecuaciones conocidas y ya testadas.

Las ecuaciones de volúmenes más conocidas se la puede clasificar en cinco grandes grupos:

a. ecuaciones aritméticas no formales

Nässlund

$$V = a + b D^2 + c D^2H + d H^2 + e DH^2$$

Comprensiva

$$V = a + b D + c DH + d D^2 + e H + f D^2H$$

Meyer modificada

$$V = a + b D + c DH + d D^2 + e D^2H$$

Australiana

$$V = a + b D^2 + c H + d D^2H$$

Variable combinada de 1er. grado

$$V = a + b D^2H$$

Variable combinada de 2do. grado

$$V = a + b D^2H + c (D^2H)^2$$

Factor de forma constante

$$V = a D^2H$$

b. ecuaciones aritméticas

Variable combinada formal

$$V = a + b K + c D^2H + d K D^2H$$

Formal reducida

$$V = a + b K D^2H$$

c. ecuaciones logarítmicas no formales

Schumacher

$$V = a D^b H^c$$

$$\log V = \log a + b \log D + c \log H$$

Dwight

$$\log V = \log a + b \log D + (3-b) \log H$$

Variable combinada logarítmica

$$\log V = \log a + b \log (D^2H)$$

d. ecuaciones logarítmicas formales

Variable combinada logarítmica formal

$$\log V = \log a + b \log (K D^2H)$$

e. ecuaciones recíprocas

Takata

$$V = D^2H / (a + bD)$$

$$V = D^2 / (a + b/H)$$

$$V = D^2 / (a + b/H + c/H^2)$$

$$V = D^2 / (a + b_1H + cH^2)$$

Los coeficientes de las fórmulas de regresión se los obtiene resolviendo los sistemas de ecuaciones aplicados en el Método de los Cuadrados Mínimos

Ejercicio N° 15. Cálculo de regresión para elaborar una tabla de volumen con una entrada.

La fórmula original será:

$$V = a \cdot D^b$$

V = volumen en metros cúbicos

D = DAP en centímetros

que representa su forma gráfica a una curva parabólica. Utilizando papel logarítmico (di-log) esta curva se la puede transformar en una recta obedeciendo a la fórmula:

$$\log V = \log a + b \log D$$

que al substituir

$$\log V = Y$$

$$\log a = a$$

$$\log D = X$$

la fórmula de trabajo será:

$$Y = a + bX$$

que corresponde a una ecuación lineal donde

a = constante que indica el origen de la recta en el eje Y

b = coeficiente de regresión

Cuadro N^o 11. Orden de las variables para el cálculo de regresión

n	DAP cm	Vol m ³	log DAP D	log Vol V + 2	log DAP ² D ²	log DAP * log Vol D • (V+2)
1	18,5					
2	22,0					
3	25,5					
4	27,0					
5	32,0					
.						
.						
.						
.						
.						
17	102,5					
18	110,0					
			Σ log D	Σ log V	Σ log D ²	Σ(log D • log V)
			31,8929	45,5939	57,2184	82,3957

Factor de corrección para $\Sigma (\log D)^2$

$$FC_D = \frac{(\Sigma \log D)^2}{n}$$

$$FC_D = \frac{(31,8929)^2}{18} = 56,5087$$

Factor de corrección para $\Sigma (\log D \cdot \log V)$

$$FC_{D \cdot V} = \frac{\Sigma \log D \cdot \Sigma \log V}{n}$$

$$FC_{D \cdot V} = \frac{31,8929 \cdot 45,5939}{18} = 80,7845$$

Cálculo de los promedios aritméticos:

$$D_{\text{medio}} = \frac{\Sigma \log D}{n} = \frac{31,8929}{18} = 1,771$$

$$V_{\text{medio}} = \frac{\Sigma \log V}{n} = \frac{45,5939}{18} = 2,5329$$

$$V_{\text{medio}} = 2,5329 - 2 = 0,5329$$

es substraído por 2, a fin de eliminar su presencia en la columna de log Vol, donde fué adicionado + 2.

Cálculo de los cuadrados:

suma de los cuadrados corregidos de D:

$$SCCD = \Sigma \log D^2 - \frac{(\Sigma \log D)^2}{n}$$

$$SCCD = 57,2184 - \frac{(31,8929)^2}{18} = 0,7096$$

suma de los productos corregidos:

$$SPC = \Sigma(\log D \cdot \log V) - \frac{\Sigma \log D \cdot \Sigma \log V}{n}$$

$$SPC = 82,3957 - \frac{31,8929 \cdot 45,5939}{18} = 1,6112$$

determinación del coeficiente de regresión:

$$b = \frac{SPC}{SCC_D} = \frac{1,6112}{0,6918} = 2,2706$$

que corresponde al valor de la inclinación de la recta.

Determinación de la constante:

$$\log a = V_{\text{medio}} - \frac{b \cdot \Sigma \log D}{n}$$

$$\log a = 0,5329 - \frac{2,2706 \cdot 31,8929}{18} = - 3,4902$$

substituyendo valores en la fórmula original

$$\log V = \log a + b \log D$$

$$\log V = - 3,4902 + 2,2706 \log D$$

$$\log V = 2,2706 \log D - 3,4902$$

$$V = \frac{D^{2,2706}}{\text{antilog}-3,4902} = \frac{D^{2,4902}}{4018,8}$$

$$V = \frac{1}{4018,8} \cdot D^{2,2706}$$

$$V = 0,0002 \cdot D^{2,2706}$$

transformándola la ecuación en logaritmos se tendrá:

$$\log V = \log 0,002 + 2,3362 \log D$$

que sería la fórmula final de trabajo que permitirá elaborar la tabla correspondiente.

Ejercicio N° 16. Elaborar una tabla de volumen con los datos constantes en el Cuadro N° 3 utilizando las fórmulas:

$$V = a + b D^2H$$

$$V = a D^2H$$

3.2 Criterios de selección de la ecuación

Entre los criterios comunes adoptados para escoger la "mejor" ecuación, los siguientes ofrecen alto grado de decisión:

a. Coeficiente de correlación (R^2)

Este coeficiente está definido como la razón existente entre la suma de los cuadrados debido a la regresión y la suma de los cuadrados totales, corregidos por el promedio.

Su cálculo se lo podrá realizar considerando el siguiente esquema:

variable		producto xy	cuadrados	
independiente x	dependiente y		x ²	y ²
1				
2				
.				
.				
.				
n				
Σx	Σy	Σxy	Σx^2	Σy^2

ecuación: $Y = a_0 + b_1X + \text{error}$

$$b_1 = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

$$a_0 = \bar{y} - b_1\bar{x}$$

$$R^2 = \frac{\text{suma de los cuadrados de la regresión}}{\text{suma de los cuadrados totales}}$$

$$R^2 = \frac{b_1(\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n})}{\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}}$$

b. Error padrón residual (EPR)

El EPR es una medida de dispersión entre los valores reales obtenidos por la cubicación rigurosa y los estimados por la regresión:

$$EPR = \sqrt{\frac{SCCy - \frac{(SPCxy)^2}{SCCx}}{n-1}}$$

El EPR puede ser calculado en % con relación al promedio del volumen a través de la fórmula:

$$EPR (\%) = (s / V) \cdot 100$$

Un EPR (%) aceptable debe ser inferior a 12 %.

c. Distribución uniforme de los valores residuales

La distribución uniforme de los residuos significa que la diferencia entre los valores reales y los estimados debe ser homogénea.

Estos tres primeros criterios son utilizados para ecuaciones de la misma naturaleza, vale decir que las variables utilizadas son del mismo origen.

d. Índice de Furnival (IF)

Este índice permite la comparación de ecuaciones volumétricas de diferentes naturalezas. Para alcanzar la interpolación de éste índice se debe efectuar previamente las siguientes operaciones:

- el EPR será obtenido del ajuste de la regresión en consideración

- con auxilio de logaritmos se calcula los promedios geométricos de las derivadas de las diferentes variables dependientes. Cuando la variable dependiente (V) no es transformada implica que se trata de una derivada igual a 1. En ese caso el Índice de Furnival será simplemente el EPR. Cuando la variable dependiente es transformada (log de V) la derivada será V^{-1} siendo que el promedio geométrico se lo obtiene con el inverso de

$$\text{anti log } \frac{\text{suma de log } V^{-1}}{n}$$

n = número de observaciones.

- finalmente cada EPR será multiplicado por el inverso del promedio geométrico calculado considerando que se está trabajando

con logaritmos neperianos. Usando logaritmos naturales se debe multiplicar el resultado por $(\log e)^{-1}$ de acuerdo con la corrección realizada por Furnival (1961):

$$IF = [F' (V)]^{-1} \cdot EPR$$

$$IF = [F' (V)]^{-1} \cdot EPR \cdot (\log e)^{-1}$$

La ecuación que presente el menor índice será seleccionada como siendo la "mejor" para la construcción de la tabla de volumen.

En el caso de seleccionar una ecuación de forma logarítmica se debe proceder a la realización de la corrección de la discrepancia logarítmica (d.1) propuesta por Meyer (1941):

$$d.1 = 10^{1,1513 (s \cdot s)}$$

$$s^2 = \text{cuadrado del error padrón residual}$$

e. Facilidad de aplicación

Se refiere basicamente a la cantidad y calidad de las variables que ingresan en la ecuación. Calidad en el sentido de que las variables fuesen medidas con exactitud. En consecuencia se deberán seleccionar ecuaciones que tengan menor número de variables siempre que los criterios anteriormente mostrados no sean suficientes para determinar la ecuación de trabajo.

Ecuaciones seleccionadas para especies de un determinado local o sitio podrán ser empleados en otras especies y en otros locales desde que se proceda a la prueba de X^2 y se encuadren en las propuestas presentadas por Freese (1962).

3.3 Métodos de los árboles modelo

Considerando la fórmula padrón para el cálculo del volumen de un árbol

$$v = g \cdot h \cdot f$$

el volumen del macizo forestal será:

$$V = G \cdot H \cdot F$$

donde G = área basal total

H = altura media

F = factor de forma medio.

Para determinar el valor de G se podrá utilizar cualquier criterio de los ya comentados. En lo que se refiere a la altura y forma, las operaciones de cálculo se tornan más trabajosas y menos precisas.

En la aplicación de los métodos siguientes los árboles son divididos en clases de diámetros caracterizados por la frecuencia, de tal forma que se podrá obtener la altura y forma media por clase diamétrica y su correspondiente volumen.

Al seleccionar los árboles muestras considérese los siguientes puntos:

- elegir varios tipos de árboles por clase diamétrica a fin de determinar con mayor precisión el DAP medio. En muchos casos trabajando con los árboles dominantes desde que no fuesen los mayores, bifurcados o de tronco retorcido, se consiguen buenos resultados.

- los árboles seleccionados deben representar el factor de forma. En plantaciones o rodales los árboles de la misma especie, edad, diámetros y alturas semejantes tienden a un factor de forma común pero considérese que el factor de forma es una variable dependiente de las variaciones del sitio.

Los métodos basados en árboles modelo están subdivididos en tres grupos: los que consideran clases diamétricas, los que consideran árboles distribuidos proporcionalmente (promedio por frecuencias) por clases o grupos de clases diamétricas o de áreas basales totales y aquellos que trabajan con un solo grupo de árboles.

En la práctica la altura media y el coeficiente de forma promedio son determinados apenas en un árbol por clase diamétrica. El árbol que presentase esas características será considerada como árbol modelo para la respectiva clase diamétrica y será cubificada rigurosamente.

Entre los métodos que utilizan árboles modelos, cinco de ellos merecen ser citados.

3.3.1 Método de Draudt (1857)

Este método utiliza el número total (Q) de los árboles modelo repartidos proporcionalmente (por su frecuencia) en las respectivas clases diamétricas.

Conocido el diámetro medio por clase se escoge el árbol modelo y después de cubicarlo su cálculo se realizará con la siguiente fórmula:

$$V = \frac{N}{Q} (G_1 H_1 \Sigma F_{1j} + \dots + G_m H_m \Sigma F_{mj})$$

V = volumen de la plantación (macizo forestal)

N = número total de árboles de la plantación

Q = número de árboles modelo distribuidos proporcio-

nalmente por clases de diámetro
 G_1, G_2, \dots, G_m = valor medio de la área basal de la
 clase diamétrica
 H_1, H_2, \dots, H_m = altura media de la clase diamétrica
 Q_1, Q_2, \dots, Q_m = número de árboles modelo por clase
 diamétrica
 F_{ij} con $i = 1, 2, 3, \dots, m$
 $j = 1, 2, 3, \dots, q$
 = coeficiente de forma del árbol modelo por
 clase diamétrica.

La exactitud de los resultados depende en gran parte del
 número de árboles medidos. Un único árbol podrá dar buenos
 resultados desde que éste realmente represente el árbol medio de la
 clase diamétrica, lo que en la práctica difícilmente se lo
 encuentra.

3.3.2 Método de Urich (1881)

Este método es muy parecido al anteriormente mostrado. Su
 diferencia consiste en que el número de árboles modelo es constante
 (de 2 a 5) por clase diamétrica.

3.3.3 Método de Hartig (1868)

La diferencia de éste método con los dos anteriores es que se
 considera grupos iguales de áreas basales. Su fundamento está en el
 principio de que aumentando el valor del DAP aumenta rápidamente su
 volumen resultando que un árbol modelo en un grupo constituido por
 árboles de diámetros menores representa un volumen diferente que en
 otro grupo donde los árboles están con diámetros mayores.

El número de árboles modelo referente a un grupo debe ser
 igual al de cualquier otro grupo. El volumen será calculado por:

$$V = \frac{G}{m} (H_1 F_1 + \dots + H_n F_n)$$

$$V = \Sigma H_i F_i$$

que también puede ser calculado por:

$$V = G \cdot HF$$

donde HF = altura formal de la plantación
 definida por:

$$HF = \frac{H_1 F_1 + H_2 F_2 + \dots + H_m F_m}{m}$$

Cuando los grupos de área basal envuelven un número grande de clases diamétricas la precisión de éste método queda bastante afectada.

3.3.4 Método de Hossfeld (1812)

Este método obliga trabajar con la frecuencia de la distribución de los árboles modelo por clase diamétrica. El número de los árboles modelo consecuentemente no depende del número de árboles por clase.

El método de Hossfeld bastante más trabajoso que los anteriores, resumidamente considera las siguientes operaciones:

- a. medir el DAP de todos los árboles de la plantación
- b. agrupar los DAP's en clases diamétricas y determinar la respectiva área basal y diámetro medio por clase
- c. estimar las alturas medias correspondientes a los diámetros medios a través de curvas hipsométricas o medición directa en el árbol modelo
- d. cubicación del árbol modelo para determinar el factor de forma.

El cálculo correspondiente se lo realizará por:

$$V = G_1 H_1 \frac{\Sigma F_{1j}}{q} + G_2 H_2 \frac{\Sigma F_{2j}}{q} + \dots + G_m H_m \frac{\Sigma F_{mj}}{q}$$

3.3.5 Método del árbol modelo (Huber, 1824)

En éste modelo los árboles son reunidos en un solo grupo. Método muy simple y de uso bastante práctico. Cuando ocurre una variación grande en los valores diametrales el error es sensiblemente superior al de los métodos anteriores llegando hasta cerca de 20%.

Conociendo el valor medio del volumen (v) de la plantación y su correspondiente número de individuos (N), el volumen total será calculado por:

$$V = N \cdot v$$

Si los diámetros de los árboles fuesen bastante semejantes (poca variación diametral), la cubicación del árbol modelo con diámetro medio dará buenos resultados a través de la fórmula:

$$V = G \cdot H \cdot F$$

Cuando la altura media proviene de una curva hipsométrica, la fórmula de trabajo será:

$$V = GH \frac{\Sigma F_j}{Q}$$

En la práctica común, considerándose la precisión de los métodos basados en tablas, los que se refieren a los árboles modelo dejan de ser calculados cuando se dispone de tablas de volumen.

3.4 Precisión de las tablas

Para asegurar el valor de las tablas de volumen se comparan los volúmenes estimados (valores de la tabla) con los obtenidos por la cubicación en el campo, de tal forma que las dos pruebas más utilizadas son:

- a. Por la diferencia agregada (DA) o porcentaje de la diferencia total

$$DA = \left(\frac{\Sigma Ve - \Sigma Vr}{\Sigma Ve} \right) \cdot 100$$

ΣVr = sumatoria de los valores reales
 ΣVe = sumatoria de los valores estimados.

La diferencia agregada debe ser menor a 1%. Caso fuese mayor significa que la tabla es defectuosa produciendo errores de estimación altos. Su corrección se la realiza construyendo una otra tabla con mayor número de datos reales.

- b. Porcentaje de la desviación media (PDM) o porcentaje promedio de las desviaciones

$$PDM = \frac{1}{n} \Sigma \left[\frac{|(Vr - Ve)|}{Ve} \right] \cdot 100$$

| símbolo de facultad
 n = número de árboles

El valor de la diferencia entre el volumen real (Vr) y el del estimado (Ve) se lo debe considerar en su valor absoluto. El resultado porcentual debe ser menor a 10%.

III. INVENTARIOS FORESTALES POR MUESTREO

1. Definición de inventario forestal

Loetsch y Haller (1964) definen que el inventario forestal es la tabulación confiable y satisfactoria de informaciones sobre árboles relativos a una determinada área forestal, de acuerdo a un fin previsto. Husch (1971) indica que el inventario forestal es un método de descripción cuantitativa e cualitativa de árboles forestales de una determinada área y de las características del local donde crecen. Spurr (1952) manifiesta que la determinación de cualquier variable dendrométrica en un inventario forestal deberá ser interpretada con cierto grado de precisión y confiabilidad.

A partir de la década de los años 30, después de los trabajos realizados por Krutzsch y Loetsch (1938) y gracias a la introducción del cálculo de probabilidad estadística en la ciencia forestal, los inventarios forestales adquieren bases matemático estadísticas. La diferencia fundamental entre los inventarios forestales realizados principalmente en Europa durante el siglo pasado con los que se realizan hoy en día es la posibilidad de calcular el error. El desvío padrón medio (σ) permite establecer la precisión de la probabilidad de que los parámetros calculados se aproximen con alto grado de seguridad al valor real verdadero.

Con el desarrollo tecnológico y la necesidad de contar con informaciones precisas y bien detalladas de los macizos forestales los inventarios forestales en la última década pasaron a ser documentos complejos conteniendo valiosas descripciones no solo del volumen de madera sino que también consideran informaciones adicionales de intereses específicos (previamente solicitados).

La realización de inventarios forestales esta vinculada estrechamente con la teoría del muestreo, considerando que las poblaciones forestales (rodales, macizos, vuelos, etc.) son generalmente extensos. Tentar medir todos los individuos o sea el 100% de una población forestal se torna difícil, trabajosa y costosa. Pero existiendo necesidad de medir el 100% de los individuos de una población forestal se considerará el inventario forestal como un censo y en la literatura se lo conoce como Levantamiento por Numeración Completa o Conteo Pie a Pie. Inclusive teniendo el mayor cuidado posible por el inmenso número de individuos que serán medidos, existe en forma casi que natural varias fuentes de errores que difícilmente se las puede eliminar. En ese sentido también en un levantamiento por numeración completa se deberá considerar cierto error de cálculo.

La teoría del muestreo ingresa en la especialidad de la dasometría en los últimos 30 años y a través de ella es posible medir apenas un parte de una población forestal e inferir sus resultados al total de esa población con el mismo o tal vez menor grado de error que en los levantamientos por numeración completa.

De esta forma las características básicas de los inventarios forestales son su precisión aceptable a un costo mínimo (relativamente menor que en el conteo pie a pie) y presentar parámetros a un nivel de probabilidad previamente definido.

1.1. Clasificación de los levantamientos por muestreo

La literatura no registra una clasificación clásica de los levantamientos o inventarios forestales por muestreo pero en un primer intento se podrán identificar dos niveles de clasificación bien característicos:

- a). por su periodicidad, en
 - muestreo de una sola ocasión
 - muestreo de múltiples ocasiones;
- b). por su estructura, en:
 - muestreo aleatorio
 - muestreo sistemático
 - muestreo mixto.

Considerando la población que será observada y a ser extrapolada se debe definir entre el:

- método de muestreo,
- proceso de muestreo, y
- sistema de muestreo.

El método de muestreo se refiere a la forma como interpretar la unidad de muestreo. El proceso de muestreo se orienta a inferir a la población como un todo y en consecuencia el sistema de muestreo será el conjunto de métodos y procesos estructurados para aplicación de una determinada área de muestreo.

En esas condiciones preliminares entre los métodos de muestreo se tienen como principales:

- método de área fija
- método de área variable (Bitterlich)
- método 3P (three point sampling)
- método por número de árboles (Prodan).

Entre los procesos de muestreo cuando son constituidos de una única ocasión la metodología de cálculo es más específica y directamente aplicada a la población. Siendo de múltiples ocasiones los cálculos son más complejos y precisan de ser cuidadosamente elaborados (previamente). La interligación entre ocasiones sucesivas implica en el uso de técnicas de regresión, correlación y de complejos estimadores de precisión.

Los levantamientos forestales constituidos por una única ocasión son clasificados en:

- muestreo aleatorio irrestricto o restricto
- muestreo estratificado
- muestreo en dos o varias etapas
- muestreo en dos o varias fases
- muestreo sistemático
- muestreo en grupos o conglomerados
- muestreo mixto.

Los procesos de muestreo que consideran múltiples ocasiones pueden ser agrupados en:

- muestreo independiente
- muestreo con repetición parcial
- muestreo con repetición total
- doble muestreo.

Detalle de varios de estos métodos y procesos de muestreo forestal pueden ser analizados en Loetsch y Haller (1964), Cochran (1963), Lanly (1974), Husch, Miller y Beers (1972), Freese (1962).

2. Conceptos de muestreo

El bosque o rodal que será observado a través de un inventario forestal deberá ser dividido en unidades de muestreo. El número de estas unidades así como su tamaño y forma podrán ser variables dependiendo en su definición de la finalidad del propio inventario y de los materiales y recursos disponibles.

De cualquier forma las unidades de muestreo deben estar estructuradas de tal forma que permitan su sorteo, condición básica para que puedan ingresar en el cálculo de la probabilidad estadística. Otra característica de las unidades de muestreo es que estas sean representativas de la población, vale decir considere las fluctuaciones posibles que podrían existir de la magnitud de las variables de medida. Una vez que se cumplan esas condiciones básicas se podrán obtener muestras (parcelas) reales de cálculo y en función de ellas realizar extrapolación de resultados al total de la población.

El proceso de obtención de una muestra consistirá en elegir un número predeterminado de elementos de la propia población a través de una

- selección aleatoria
- selección regulada o sistemática
- selección mixta.

2.1 Parámetros dendrométricos

La muestra o parcela es una función de la población formado por un número limitado de objetos de medición que presentan un conjunto de caracteres que identifica el universo al que representa.

La teoría del muestreo, fundamentada en las parcelas de muestreo tiene por objetivo estimar ciertas constantes de la población que se las denomina de parámetros.

Población será el conjunto de individuos con cierta característica común, así se podrá tener una población de DAP's que serán todos los árboles que presenten cierto valor específico de DAP. De tal forma que los principales parámetros de la población serán:

- a. el promedio o valor medio
- b. la desviación standard, que caracteriza la dispersión de los individuos con respecto a la media
- c. el coeficiente de variación, que interpreta la desviación standard sobre la media (grado de variabilidad)
- d. el error standard de la media, se refiere a la variación que puede existir entre las unidades individuales de la población
- e. covariancia, medida de la asociación entre magnitudes de dos características
- f. coeficiente de correlación, medida referente al grado de asociación lineal entre dos variables.

2.2 Estimadores estadísticos

Cualquier sistema de muestreo procura estimar alguna característica de la población sin necesidad de medir todas las unidades de muestra, de tal forma que las n unidades tengan la misma oportunidad de ingresar al cálculo correspondiente a fin de que el grupo o combinación de las parcelas de muestreo escogidas permitan realizar el cálculo de estimadores muestrales de la muestra y del total de la población.

En ese principio todo modelo de muestreo deberá obtener una estimación de la variancia de la población o desvío estándar y el límite de confianza a través de los estadísticos o estimadores estadísticos, asumiendo que las poblaciones observadas están normalmente distribuidas.

El número de observaciones necesarias en una muestra dependerá de la precisión deseada y de la variabilidad inherente a la población muestreada. La precisión muestral normalmente se la podrá expresar en términos de intervalo de confianza sobre la media calculada.

Ya que la variancia en primera instancia es un parámetro difícil de ser interpretado, los sistemas de muestreo forestal requieren de un levantamiento piloto. En esas parcelas iniciales se podrá calcular la variancia y de esa forma ingresar posteriormente en forma segura a cualquier proceso estadístico.

2.3 Cálculo probabilístico

Ya se indicó en párrafos anteriores que los trabajos de inventarios estarán considerando apenas una parte del total de la población y para entender mejor el cálculo probabilístico se muestra el ejemplo siguiente:

- considerese una urna que contenga n bolillas siendo " a " del color blanco. Sacando al azar una bolilla puede ser ésta una de las " a " blancas o de las " $n-a$ " no blancas. Como al extraer la bolilla de la urna podrá ser cualquiera de la " n " que contiene, se dice que existirá n casos posibles a la presentación de una bolilla. Pudiendo ser una de las " a " blancas se dirá que existen " a " casos favorables a la presentación de una bolilla blanca.

La probabilidad (p) de extraer una bolilla blanca se define como la razón entre el número de casos posibles (n) y su expresión matemática será:

$$p = a / n$$

variando el valor de la probabilidad de 0 a 1. En efecto si no hay ningún caso favorable $a = 0$ y su probabilidad será $p = 0/n = 0$.

Si todos los casos son favorables $a = n$ la probabilidad será $p = n/n = 1$.

En el primer caso la probabilidad nos indica la imposibilidad de que el acontecimiento se presente y en el segundo caso la certeza de presentación de dicho acontecimiento.

El acontecimiento contrario, la extracción de bolillas no blancas, su probabilidad (q) será:

$$p + q = 1$$

Analizando las variables dendrométricas, discretas cuando la variable solo puede tomar ciertos valores aislados de un intervalo y continuas cuando la variable puede tomar cualquier valor de un intervalo, las distribuciones de probabilidades se pueden sintetizar de la siguiente manera:

- distribución binomial (variable discreta)
- distribución normal (variable continua).

Con la distribución binomial se puede resolver el problema de calcular la probabilidad de "m" éxitos en "n" pruebas independientes, siendo "p" la probabilidad elemental de que se presenta, manteniendo "p" constante a través de las "n" pruebas. El ejemplo clásico para conocer esta distribución es el método de analizar el problema de arrojar al aire distinto número de monedas, desde una hasta "n", y determinar así todas las posibilidades de presentación de cara o escudo en cada fenómeno. Esta distribución es poco usada en trabajos dasométricos.

La distribución normal es un tipo de distribución continua y puede ser considerada como un caso límite de la distribución binomial cuando el exponente "n" es muy grande. En efecto si se realiza la representación gráfica de una distribución originada en la expresión

$$(1/2 + 1/2)^6$$

cuyas frecuencias relativas o probabilidades para los distintos valores de "x" son

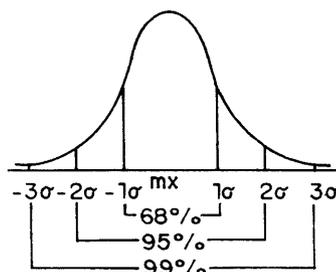
$$P_0 = 0,01 \quad P_1 = 0,09 \quad P_2 = 0,23 \quad P_3 = 0,31$$

$$P_4 = 0,23 \quad P_5 = 0,09 \quad P_6 = 0,01$$

permite obtener el gráfico clásico de la distribución normal, en la que por ser iguales los valores de "p" y "q" tendiendo "n" al infinito, se obtiene una curva simétrica con respecto a un valor promedio que corresponde a la media aritmética de una población dada (Figura N° 32).

La curva normal de probabilidades es análoga a la curva normal de los errores o Campana de Gaus. El principio de Gaus indica que si se mide muchas veces una misma magnitud, se cometen en forma involuntaria errores en dichas mediciones y se obtendrá también un gran número de medidas diferentes. En el estudio de las poblaciones remplazando el concepto del error por el de las desviaciones con respecto a la media, las ordenadas representarán las frecuencias de tales desviaciones.

Figura 32. Curva de la distribución normal



En los problemas que se plantean en los inventarios forestales resulta importante saber cual es la probabilidad de encontrar en una población individuos que se desvien con respecto a la media en una cantidad igual o mayor que una desviación determinada.

Para un proceso de explotación forestal por ejemplo, en una población de DAP's se solicita conocer la probabilidad de encontrar un árbol que se desvie de la media en 10 cm o más. Si suponemos que el DAP medio de esa población es de 40 cm, lo que interesará saber será la probabilidad de encontrar árboles que tengan DAP igual o mayor a 50 cm. Dicha probabilidad podrá obtenerse a partir de la curva normal correspondiente a una población normalmente distribuida.

2.4 Teoria de las muestras

Ya se indicó que una muestra de una población es un número limitado de individuos u objetos y cada uno de los cuales se posiciona como un elemento de la población. Sobre la base del número de individuos que integran una muestra, llamaremos de muestra pequeña a aquella en que el número de medidas es inferior a 30 y muestra grande cuando está formada por más de 30 individuos. Sobre esa base la teoria de las muestras se dedica a tentar encontrar estimaciones de ciertas constantes de la población original. Estas constantes se refieren a las medidas de posición y de dispersión, así como los momentos y medidas de asimetría.

El objetivo de la muestra es determinar con la mayor objetividad posible el grado de confianza que se puede obtener en las estimaciones, es decir determinar la precisión de una estimación. La exactitud de la estimación dependerá consecuentemente del procedimiento empleado en el cálculo de la estimación, basado en los datos de la muestra y del procedimiento de obtención de la muestra, lo que conduce a la teoria de los estimadores y de las técnicas del muestreo.

De una población se podrá tomar un número ilimitado de muestras y de cada una de ellas se obtendrá una media y una desviación estándar. Una serie de medidas de esas medias mostrarán una variabilidad menor entre ellas y estas estarán distribuidas también de acuerdo a una distribución normal.

La desviación estándar de la distribución de medias muestrales se la denomina de Error Típico de la Media. A través de la tabla de la distribución normal los parámetros calculados podrán ser analizados de acuerdo al grado de probabilidad estadística en cuestión (previamente definido). Conocido el valor de "t" (nivel de probabilidad) será posible determinar los límites de confianza y correspondiente probabilidad del error.

3. Parcelas de medición dasométrica

Las formas de las parcelas para los inventarios forestales podrán ser rectangulares, cuadrados, en franjas, circulares y de dimensiones variables. En sí cualquier figura geométrica podrá ser empleada desde que su superficie pueda ser fácilmente determinada.

Referente al tamaño de la parcela tampoco existe un consenso común. El coeficiente de variación de la variable que asuma el mayor peso en la ecuación definirá el tamaño ideal de la parcela de muestreo. En ese sentido a partir de cierto punto de la curva que identifica el tamaño de la parcela, inclusive aumentando proporcionalmente el área de la parcela, su influencia hacia el coeficiente de variación de la variable observada queda totalmente minimizada.

4. Tipos de inventarios forestales

De acuerdo al nivel de precisión, tomando en cuenta la posibilidad de explotación de los recursos forestales que serán medidos, se identifican:

a. inventarios forestales exploratorios
presentan una descripción general del área indicando características geográficas y topográficas de la región. El vuelo forestal es observado a nivel de asociación o tipo vegetal.

b. inventarios forestales de reconocimiento
identifican los principales recursos forestales en términos semi cuantitativos. Su finalidad principal es el de identificar y delimitar el ámbito de posibles proyectos. A un costo relativamente bajo es posible identificar una primera aproximación del costo/beneficio de una explotación forestal.

c. inventarios forestales semi detallados
propios para la elaboración de anteproyectos con estudios de factibilidad técnico económica de la explotación de ciertos recursos forestales. Los mapas que acompañan estos inventarios están en escalas de 1:5000 a 1:25000.

d. inventarios forestales detallados
permiten el diseño final de proyectos de factibilidad técnico económica. Su detallamiento debe ser preciso acompañado de informaciones adicionales bien fundamentadas. Estos inventarios representan una intensidad relativamente grande de las inversiones por unidad de área física del recurso que se quiere explotar y generalmente solo serán útiles apenas para un objetivo pre-establecido.

Otra forma de clasificar los inventarios forestales será por su objetivo final, en:

- inventarios forestales comerciales
se concentran en ofrecer información dendrométrica específica a cierto fin comercial
- inventarios forestales administrativos
procuran servir como herramientas en las decisiones administrativas y políticas de cierta región. En esta categoría se encuadran los inventarios forestales nacionales.

Considerando el área que el inventario forestal deberá cubrir, se identifican:

- inventario forestal nacional
- inventario forestal regional
- inventario forestal local.

Se pregunta: cuál será el área mínima para realizar un inventario forestal?

De acuerdo a las normas de ordenación y manejo forestal de determinada región boscosa podrán existir:

- inventarios de extracción maderera
- inventarios de factibilidad industrial
- inventarios para fines de manejo forestal
- inventarios específicos (normalmente restringidos a un máximo de 10.000 hectáreas donde se considera cualquier recurso primario y/o secundario del bosque).

Tomando en cuenta el sistema de muestreo, se tendrá:

- inventarios casualizados
- inventarios estratificados
- inventarios sistemáticos
- inventarios mixtos.

Analizando la metodología de campo o técnicas de muestreo se podrán diferenciar:

- inventarios por parcelas unificadas
- inventarios con subparcelas
- inventarios por conglomerados
- inventarios en fajas
- inventarios combinados.

Ejercicio N° 17. a). Indicar para cada uno de los inventarios forestales enunciados los parámetros que deberían ser presentados como resultados principales.

b). En una hacienda de 5.000 hectáreas localizada entre las localidades de Villamontes y Yacuiba se requiere conocer las existencias detalladas de la especie Quebracho colorado. Que modelo de inventario forestal recomendaría que fuese ejecutado y que parámetros dasométricos ofrecería para que fuesen presentados?

IV. INVENTARIO FORESTAL ENTERAMENTE CASUALIZADO

El objetivo de éste capítulo es el de mostrar a través de un estudio de caso la obtención de informaciones volumétricas de una plantación de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en la edad de aproximadamente 10 años. Paralelamente se pretende mostrar el procedimiento de cálculo correspondiente.

1. Características del rodal

La plantación de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, objeto del presente estudio se encuentra en los alrededores de la ciudad de Brasilia (Distrito Federal, Brasil). El área reforestada con la especie en estudio cubre una superficie de 250,8800 hectáreas, distribuidas en 6 tallones de tamaños diferentes. La producción de madera de estas plantaciones está destinada principalmente al consumo de leña y carbón vegetal.

La precipitación anual para el local del estudio es de 1.577 mm con una evapotranspiración potencial de 949 mm y una temperatura media anual de 20,4° C. El área de estudio ecológicamente corresponde a un clima subtropical semihúmedo de tipo megatérmico.

2. Diseño del muestreo

El modelo del inventario forestal corresponderá al diseño de muestreo estrictamente casualizado sin restitución. Las unidades estadísticas fueron parcelas rectangulares de 600 metros cuadrados (20 x 30m).

Diseñadas las parcelas de muestreo en un mapa base se procedió por medio de un levantamiento piloto al cálculo de la intensidad de muestreo en cuatro unidades. De un total de 3873 parcelas fueron escogidas aleatoriamente, a través de la tabla de números casualizados, 58 unidades de registro. Estas parcelas fueron identificadas por medio de coordenadas, lo que permitió realizar el lay-out correspondiente para los trabajos de campo. Como toda el área plantada con ésta especie corresponde a un espaciamiento de 3 x 2 metros, en cada parcela se debería encontrar cerca de 105 individuos.

Cuando las plantaciones cumplieron la edad de 10 años, se realizaron los trabajos de medición de campo. Las variables dendrométricas fueron el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y la Altura Total (H) del árbol. Para tal efecto se utilizaron forcípulas de 80 cm e hipsómetros Haga respectivamente. La precisión de los valores medidos fueron definidos en unidades de 5 cm para el DAP y 50 cm para la altura.

En las parcelas de muestreo fueron medidos todos los individuos con DAP igual o mayor a 5 cm. El proceso de medición de las variables dendrométricas siguió estrictamente las recomendaciones del manual de campo del inventario forestal nacional (brasileño) de las reforestaciones (Imaña, 1981).

El espesor de la corteza fue medida aleatoriamente en cinco árboles por parcela. El punto de medida fue a la altura del DAP haciendo uso del instrumento propio para ese fin, el martillo medidor de corteza. La unidad de medida fue en milímetros.

3. Analisis estadístico

Todos los estimadores estadísticos (media del DAP, volumen, número de árboles por hectárea, etc.) fueron calculados con una probabilidad de acierto de 95%.

Para el cálculo del error del muestreo se utilizó la fórmula convencional del error estándar de la media ($s_{\bar{y}}$) para datos no agrupados:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}{n-1}$$

$$s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{s^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)}$$

donde S^2 = variancia de la media poblacional
 y_i = valor medido del i ésimo individuo
 N = total de parcelas existentes
 n = parcelas medidas
 t_{α} = t de Student

con 95% de probabilidad estadística en la definición del intervalo de confianza:

$$\bar{y} \pm (s_{\bar{y}} \cdot t_{\alpha})$$

4. Resultados

El inventario piloto realizado en las cuatro unidades de muestreo (parcelas 9, 17, 30 y 52, Cuadro 13) dió un coeficiente de variación (CV) medio para el DAP de 38,57%. Asumiendo un error máximo permisible de 10% (E) a una probabilidad de acierto de 95% ($t_{\alpha} = 1,98$) la intensidad de muestreo

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot CV^2}{E^2}$$

definió el procedimiento de cálculo en 58 parcelas.

En las 58 parcelas de muestreo del total de individuos que deberían existir (6090), 3698 (60,72%) presentaron un DAP mínimo de 5 cm, correspondiendo en media a 63-64 árboles por parcela. 235 árboles (3,86%) fueron catastrados como brinzales, con DAP menor a 5 cm; estando aproximadamente cuatro árboles representados por parcela. 1482 individuos (24,33%) considerados como falla no sobrevivieron la época de la plantación. Cerca de un cuarto en cada parcela quedó representada por ésta característica. El número de árboles muertos, no medidos, fué de 675 (11,08%). Detalle correspondiente se muestra en el Cuadro N° 12.

Extrapolando el número de árboles vivos (n) con DAP mayor a 5 cm de la parcela para la hectárea, se tendrá:

$$n \cdot \text{Factor de Conversión (FC)}$$

siendo

$$FC = 10.000 \text{ m}^2 / 600 \text{ m}^2$$

$$FC = 16,67$$

que corresponderá a 1063 individuos con un error padrón medio estimado en ± 82 a 95% de probabilidad estadística.

El área basal (AB) fué calculada a través de la constante:

$$AB = 0,7854 \cdot (DAP^2)$$

Resultados de estos cálculos se presentan en el Cuadro N° 13. El DAP medio de la población corresponderá a $12,45 \pm 0,67$ cm variando el correspondiente coeficiente de variación (CV) en las parcelas de muestreo entre 13,71 y 56,31% (parcelas 55 y 44 respectivamente). La altura media deberá situarse entre 14,34 y 15,72 m con un grado de variabilidad entre 13,00 y 60,70% (parcelas 23 y 13 respectivamente). El área basal media por hectárea (G) deberá estar en torno de $16,66 \pm 1,32$ metros cuadrados.

Inventarios forestales realizados en la región sur del Brasil muestran para el total de las especies de Eucalyptus un DAP medio de 11,70 cm en la edad de 10 años, y para la altura media está registrado un valor de 14,28 m y un G igual a 22,67 metros cuadrados. Estos datos no difieren demasiado de los encontrados en el trabajo realizado, de lo que se deduce que los cálculos efectuados muestran resultados dentro de parámetros esperados.

Cuadro 12. Número de árboles medidos

Parcela	Medidos			Brinzales		Fallas		Muertos	
	n	%	n/ha	n	%	n	%	n	%
1	73	69,52	1217	4	3,81	19	18,09	9	8,57
2	77	73,33	1284	5	4,76	18	17,14	5	4,76
3	54	51,43	900	3	2,86	42	40,00	6	5,71
4	84	80,00	1400	5	4,76	10	9,52	6	5,71
5	62	59,05	1034	3	2,86	38	36,19	2	1,90
6	69	66,71	1150	4	3,81	30	28,57	2	1,90
7	75	71,43	1250	5	4,76	22	20,95	3	2,86
8	64	60,95	1067	3	2,86	32	30,48	6	5,71
9	61	58,10	1017	4	3,81	33	31,43	7	6,67
10	66	62,86	1100	4	3,81	31	29,52	4	3,81
11	62	59,05	1034	4	3,81	29	27,62	10	9,52
12	78	74,29	1300	4	3,81	13	12,38	10	9,52
13	82	78,10	1367	5	4,76	13	12,38	5	4,76
14	67	63,81	1117	4	3,81	24	22,86	10	9,52
15	61	58,10	1017	5	4,76	23	21,90	16	15,24
16	56	53,33	934	5	4,76	18	17,14	26	24,76
17	69	65,71	1150	4	3,81	13	12,38	19	18,09
18	63	60,00	1050	3	2,86	32	30,48	7	6,67
19	84	80,00	1400	5	4,76	13	12,38	3	2,86
20	59	56,19	984	5	4,76	24	22,86	17	16,19
21	67	63,81	1117	4	3,81	13	12,38	21	20,00
22	45	42,86	750	4	3,81	20	19,05	36	34,29
23	50	47,62	833	3	2,86	38	36,19	14	13,33
24	74	70,48	1234	4	3,81	19	18,10	8	7,62
25	73	69,52	1217	4	3,81	20	19,05	8	7,62
26	69	65,71	1150	4	3,81	26	24,76	6	5,71
27	93	88,57	1550	5	4,76	6	5,71	1	0,95
28	66	62,86	1100	4	3,81	29	27,62	6	5,71
29	87	82,86	1450	6	5,71	10	9,52	2	1,90
30	84	80,00	1400	5	4,76	11	10,47	5	4,76
31	88	83,81	1467	4	3,81	8	7,62	5	4,76
32	71	67,62	1184	4	3,81	24	22,86	6	5,71
33	79	75,24	1317	5	4,76	20	19,05	1	0,95
34	24	22,86	400	4	3,81	25	23,81	52	49,52
35	73	69,52	1217	4	3,81	27	25,71	1	0,95
36	72	68,57	1200	4	3,81	22	20,95	7	6,67
37	46	43,81	767	3	2,86	46	43,81	10	9,52
38	70	66,67	1167	5	4,76	23	21,90	7	6,67
39	54	51,43	900	4	3,81	34	32,38	13	12,38
40	26	24,76	433	4	3,81	23	21,90	52	49,52
41	17	16,19	283	5	4,76	29	27,62	54	51,43
42	75	71,43	1250	5	4,76	18	17,14	7	6,67
43	64	60,95	1067	4	3,81	37	35,24	0	0,00
44	68	64,76	1134	3	2,86	34	32,38	0	0,00
45	84	80,00	1400	5	4,76	16	15,24	0	0,00
46	68	64,76	1134	3	2,86	34	32,38	0	0,00
47	67	63,81	1117	6	5,71	12	11,43	20	19,05

Cuadro 12. Número de árboles medidos (continuación)

Parcela	Medidos		n/ha	Brinzales		Fallas		Muertos	
	n	%		n	%	n	%	n	%
48	79	75,24	1317	3	2,86	23	21,90	0	0,00
49	52	49,52	867	5	4,76	12	11,43	36	34,29
50	71	67,62	1184	3	2,86	31	29,52	0	0,00
51	53	50,48	884	3	2,86	49	46,67	0	0,00
52	64	60,95	1067	4	3,81	36	34,29	1	0,95
53	55	52,38	917	1	0,95	31	29,52	18	17,14
54	27	25,71	450	3	2,86	42	40,00	33	31,43
55	6	5,71	100	0	0,00	98	93,33	1	0,95
56	12	11,43	200	5	4,76	32	30,48	56	53,33
57	88	83,81	1467	5	4,76	5	4,76	7	6,64
58	71	67,62	1184	4	3,81	22	20,95	8	7,62
3698			61647	235		1482		675	

Para la determinación del volumen de madera c/c (V) se utilizó la fórmula convencional:

$$V = AB \cdot H \cdot FF$$

siendo que el factor de forma (FF) fué igual a 0,5195.

El volumen calculado por hectárea se presenta en el Cuadro N° 14.

Referente al grosor de la corteza fué calculado el valor medio por parcela procediéndose a su extrapolación correspondiente de madera sólida sin corteza (metros cúbicos s/c). El factor de conversión medio del volumen con corteza para el volumen sin corteza fué igual a 0,92. El volumen de la corteza representa 6,59% del volumen total de madera (Cuadro N° 14). Esta situación es comprensible debido a que los árboles de *Eucalyptus grandis* presentan normalmente una corteza sumamente delgada.

Como la producción de madera de estas plantaciones está destinada principalmente al consumo de leña y carbón vegetal se realizó la conversión del volumen sólido de madera c/c en estéreos, unidad comúnmente utilizada en la comercialización de esos productos. Por experiencia de la propia empresa se utilizó un factor de conversión igual a 1,6.

4.1 Cálculo de los parámetros dasométricos

Para la determinación del volumen de madera así como de los otros parámetros dasométricos se procedió con el siguiente proceso de cálculo:

Cuadro 13. Parámetros dendrométricos

Parcela	I	Valores Medios Calculados				G m ² /ha
		DAP (cm)	CV (%)	Altura (m)	CV (%)	
1	I	13,94	45,72	16,69	38,76	24,26
2	I	15,68	38,76	20,36	28,46	29,51
3	I	15,53	34,29	18,70	22,39	20,65
4	I	12,23	48,72	15,90	33,52	22,25
5	I	16,19	46,95	18,00	26,44	32,16
6	I	15,25	36,98	10,09	50,95	25,94
7	I	12,85	48,99	16,43	36,82	22,23
8	I	12,52	40,04	15,03	26,34	16,63
9	I	12,31	38,58	14,98	21,02	14,73
10	I	12,14	45,82	13,78	28,37	17,14
11	I	12,11	31,03	12,95	38,05	20,10
12	I	9,64	52,93	11,69	44,91	13,98
13	I	10,23	34,25	14,43	60,70	12,80
14	I	12,94	43,97	15,83	32,99	22,21
15	I	10,68	47,57	14,63	27,70	15,04
16	I	11,43	41,99	13,93	25,41	12,96
17	I	10,91	33,62	13,73	21,12	12,21
18	I	9,83	48,43	14,33	37,40	14,28
19	I	13,47	27,42	15,26	16,51	19,17
20	I	12,75	43,75	18,07	33,86	16,03
21	I	9,01	50,95	11,56	33,71	11,07
22	I	13,88	39,91	16,00	23,52	14,88
23	I	10,94	38,00	13,59	13,00	11,73
24	I	11,34	49,90	14,03	58,26	14,75
25	I	8,88	47,95	9,60	26,35	12,17
26	I	10,54	48,97	11,09	22,90	15,59
27	I	9,79	40,22	10,85	30,87	13,98
28	I	9,13	52,31	13,76	33,09	10,77
29	I	11,73	38,82	14,26	30,82	19,48
30	I	9,80	42,45	10,60	25,56	13,14
31	I	9,86	42,31	12,97	21,74	13,89
32	I	8,40	48,29	12,36	32,68	9,95
33	I	11,38	42,70	16,31	23,48	17,10
34	I	12,71	45,03	16,52	27,48	20,50
35	I	13,18	41,52	16,06	15,94	20,10
36	I	12,40	47,26	16,50	35,03	19,95
37	I	13,77	38,37	16,39	16,41	14,32
38	I	11,86	38,96	16,79	28,51	15,88
39	I	13,20	51,94	15,84	29,29	17,27
40	I	12,60	42,94	15,29	37,67	20,16
41	I	12,05	50,95	10,82	60,24	18,18
42	I	12,11	43,99	15,28	36,13	13,75
43	I	10,73	18,45	13,52	52,18	15,15
44	I	12,95	56,31	16,17	56,46	21,50
45	I	10,99	50,83	12,60	20,24	19,97
46	I	11,02	50,15	13,19	50,59	13,86

Cuadro 13. Parámetros dendrométricos (continuación)

Parcela Nr	I I	Valores Medios Calculados				G m ² /ha
		DAP (cm)	CV (%)	Altura (m)	CV (%)	
47	I	11,82	33,99	15,34	19,68	15,71
48	I	14,57	45,08	14,57	22,17	19,35
49	I	12,22	33,63	14,15	33,73	12,04
50	I	12,24	43,09	14,84	23,72	18,05
51	I	12,92	42,11	17,16	20,34	14,07
52	I	15,25	39,64	17,41	25,30	24,62
53	I	19,31	21,08	22,42	17,49	12,39
54	I	15,76	30,43	18,89	20,10	9,50
55	I	23,24	13,71	21,16	15,48	4,30
56	I	16,54	19,39	18,53	15,24	7,54
57	I	10,46	47,00	15,59	31,81	17,19
58	I	10,98	52,69	15,07	53,25	17,86
Totales		722,19	2411,13	871,89	1792,18	965,99
Promedio		12,45	41,57	15,03	30,90	16,66

la media aritmética del volumen de madera c/c de las 58 parcelas es igual a:

$$\bar{y} = \frac{7533,67}{58} = 129,89$$

metros cúbicos sólidos con corteza por hectárea.

Utilizando los valores del Cuadro N° 13 en la formula 1 del error estándar de la media ($s_{\bar{y}}$), se obtendrá:

$$s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{1137754,10 - \frac{(7533,67)^2}{58}}{58(58-1)} \times \left(\frac{3873-58}{3873}\right)}$$

$$s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{1137754,10 - 978554,89}{3306} \times 0,985025}$$

$$s_y = 47,443515$$

$$s_y = 6,8872 \text{ m}^3 \text{ cúbicos sólidos c/c.}$$

Cuadro 14. Determinación volumétrica en m³

Parcela Nr	I I I	Volumen c/c y	Sólido de s/c	Madera por ha Estereo c/c	y ²
1	I	210,35	192,46	336,55	44247,12
2	I	312,13	283,84	499,40	97425,14
3	I	200,61	185,54	320,97	40244,37
4	I	183,79	165,36	294,06	33778,76
5	I	300,73	274,14	481,17	90438,53
6	I	135,97	125,61	217,55	18487,84
7	I	189,74	169,78	303,59	36001,27
8	I	129,85	122,57	207,76	16861,02
9	I	115,01	110,51	184,02	13227,30
10	I	122,70	113,98	196,32	15055,29
11	I	135,22	123,64	216,36	18284,45
12	I	84,50	79,94	135,84	7140,25
13	I	95,95	89,79	153,53	9206,40
14	I	182,65	166,82	292,24	33361,02
15	I	114,31	109,69	182,89	13066,78
16	I	93,79	86,83	150,06	8796,56
17	I	87,09	83,37	139,35	7584,67
18	I	72,70	68,97	116,31	5285,29
19	I	121,20	116,87	193,91	14689,44
20	I	150,48	141,42	240,77	22644,23
21	I	66,48	62,51	106,37	4419,59
22	I	123,68	117,22	197,89	15296,74
23	I	61,63	57,64	98,61	3798,26
24	I	107,51	98,73	172,01	11558,40
25	I	60,69	57,41	97,11	3683,28
26	I	89,82	82,59	143,71	8067,63
27	I	78,80	73,04	126,08	6209,44
28	I	79,99	73,79	123,18	6398,40
29	I	144,31	136,91	230,89	20825,38
30	I	72,36	69,68	115,77	5235,97
31	I	94,20	88,01	150,71	8873,64
32	I	63,89	59,90	102,22	4081,93
33	I	144,89	135,50	231,82	20993,11
34	I	175,93	167,34	281,49	30951,37
35	I	167,79	156,47	268,32	28153,48
36	I	171,01	159,49	273,61	29244,42
37	I	121,93	115,48	195,09	14866,93
38	I	138,51	131,27	221,62	19185,02
39	I	142,11	134,96	227,38	20195,25
40	I	160,13	153,11	256,21	25641,62
41	I	102,19	95,83	163,50	10442,80
42	I	109,15	103,21	174,64	11913,72
43	I	106,41	99,77	170,25	11323,09
44	I	180,61	168,74	288,97	32619,97
45	I	130,72	123,73	209,15	17087,72
46	I	94,97	89,10	151,95	9019,30

Cuadro 14. Determinación volumétrica (continuación)

Parcela	I	Volumen c/c y	Sólido s/c	de Madera Estereo c/c	por ha y ²
47	I	125,20	118,92	200,31	15675,04
48	I	146,46	137,15	243,34	21450,53
49	I	88,51	81,35	141,61	7834,02
50	I	139,15	129,36	222,65	19362,72
51	I	125,43	118,38	200,69	15732,69
52	I	222,68	209,73	356,28	49586,38
53	I	162,01	154,95	230,89	26247,24
54	I	93,31	88,11	149,29	8706,76
55	I	42,98	39,82	68,77	1847,28
56	I	80,42	75,37	128,67	6467,38
57	I	139,22	129,91	222,76	19382,21
58	I	139,82	131,64	223,72	19549,63
Total	I	7533,67	7037,25	12030,19	1137754,10

El factor t_{α} con 57 grados de libertad a un nivel de 95% de probabilidad es igual a 2,000.

Conocido el error estándar de la media (s_y) y multiplicado por t_{α} , el intervalo de confianza (IC) para el volumen de madera c/c por hectárea será definido como sigue:

$$PE [129,89 \pm 13,77 \text{ m}^3 \text{ c/c}] 0,95$$

Consecuentemente la extrapolación para el total de la población (250,8800 ha) será:

$$T [2165,27 \pm 229,55 \text{ m}^3 \text{ c/c}] 0,95$$

Por artificio matemático podemos deducir que el error de muestreo será calculado por la siguiente fórmula:

$$E = \frac{(s_y \cdot t) \cdot 100}{\bar{y}}$$

$$E = \frac{13,77 \times 100}{129,89} = 10,60 \%$$

demonstrando así que las 58 parcelas de muestreo fueron plenamente representativas pudiendo ofrecer resultados confiables.

Finalmente el grado de variabilidad, coeficiente de variación (CV) del parámetro volumen en las parcelas de muestreo interpretado a través de la desviación estándar (s), es igual a:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}{n-1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{1137754.10 - \frac{(7533.67)^2}{58}}{57}}$$

$$s = \sqrt{2792.9689}$$

$$s = 52,848547$$

Consecuentemente el coeficiente de variación para el volumen c/c será igual a:

$$CV = \frac{s \times 100}{\bar{y}}$$

$$CV = \frac{52.85 \times 100}{129.89} = 40,69\%$$

valor poco distante del coeficiente de variación del DAP encontrado en el levantamiento piloto, lo que concluye que la población fué interpretada correctamente.

5. Discusión

En el relatorio del inventario forestal realizado en las regiones Alto-Medio Sao Francisco y región metalúrgica del Estado de Minas Gerais (Brasil) se indica un volumen medio de 97,31 y 71,02 metros cúbicos c/c por hectárea respectivamente para el total de las especies de Eucalyptus en la edad de 10 años (Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1980). El mismo trabajo registra para la región del Distrito Federal un volumen de 47,34 m³ /ha en la edad de 8 años.

En el Estado de Santa Catarina - Brasil (IBDF/Inventário Florestal Nacional, 1984) fué registrado para el total de la especie de Eucalyptus los siguientes datos:

Región Oeste y Centro: 161,4 m³ c/c por ha,
Región Norte y Noreste: 228,4 m³ c/c por ha, y
Región Centro-este y Sur: 97,1 m³ c/c por ha.

5.1 Conclusiones

Los resultados permiten concluir que el análisis estadístico del modelo de muestreo con parcelas estrictamente casualizadas sin restitución es extremadamente simple en su proceso matemático y el error de muestreo calculado igual a 10,60% muestra la eficiencia del modelo en la aplicación a las plantaciones de Eucalyptus de esa región.

El volumen medio por hectárea (129,89 m³ c/c) corrobora con datos conocidos de otras áreas del Brasil.

V. PLANIFICACION DE UN INVENTARIO FORESTAL

La ejecución de cualquier inventario forestal requiere de una minuciosa planificación y correcta organización de todas las actividades inherentes, que en términos relativos podrá ser semejante a una operación militar. Para que un inventario forestal pueda alcanzar el éxito deseado necesariamente precisará ser planeado, organizado y ejecutado por personal que tenga profundo conocimiento técnico científico sobre levantamientos forestales por muestreo y acumule vasta experiencia en esta especialidad.

1. Consideraciones preliminares

La planificación de un inventario forestal requiere tomar cuidados especiales en la problemática que pretende alcanzar, es decir se debe decidir con precisión la información que será ofrecida cumpliendo desde luego el objetivo principal del propio requerimiento para ejecutar el correspondiente levantamiento y análisis de los datos de campo. En ese sentido la primera pregunta que se debe hacer será: cuál la información deseada?

De cualquier forma existen principios básicos comunes para cualquier tipo de inventario y su ejecución deberá ser realizada con el mínimo de dinero, tiempo y trabajo, es decir que el inventario en sí tiene que estar optimizado.

La planificación y desarrollo de un inventario exige considerar principalmente las siguientes consideraciones:

- información final que se obtendrá,
- manipuleo de esa información,
- factores de tiempo y de personal,
- preparación del sistema o modelo de muestreo,
- características de la muestra,
- utilización logística de la información conocida,
- presentación de relatorios.

La fase inicial a la planificación consistirá en la compilación y estudio de todos los datos existentes sobre el rodal o macizo forestal y del local donde se encuentra. Los mapas, fotografías aéreas, informes, etc. son herramientas muy valiosas que deben ser utilizadas. Ya en esta fase debe quedar muy claro el objetivo principal del inventario, vale decir que tipo de información será ofrecida y cuál el público que esa información recibirá. Un mismo parámetro orientado a una industria podrá obtener una otra definición tratándose del sector administrativo gubernamental.

Identificado el parámetro principal normalmente el volumen de madera/ha se aconseja que esté acompañado de informaciones

adicionales en función del propio objetivo del inventario, como por ejemplo la calidad de esa madera, la distribución espacial, etc. Otra información adicional importante será la de ofrecer condiciones básicas para un posible proceso de explotación del recurso forestal observado.

Definidos los parámetros del rodal o macizo forestal, las unidades de medida y su exactitud obedecerán un segundo cuestionamiento y tanto el error permisible como el grado de probabilidad en esta fase deberán estar ya definidos.

Dependiendo del error y de la probabilidad definida existirá necesidad de planear la distribución de las parcelas de muestreo, que éstas por su forma y tamaño por supuesto estarán estrechamente vinculadas al personal y tiempo disponibles.

2. Factores tiempo y personal

Los factores tiempo y personal son elementos reguladores y limitantes de la planificación del inventario. A estos factores no solo se los debe considerar en la fase de los trabajos de campo sino que estarán distribuidos a lo largo de todas las actividades pertinentes del inventario.

Considere que el factor tiempo es menos flexible que el del personal y ambos estarán estrechamente vinculados al factor costo.

El factor tiempo sobre todo para la fase de los trabajos de campo estará considerado como una constante, debiendo en su planificación concentrarse más en los límites inferiores (menor tiempo posible).

Referente al factor personal dependiendo del inventario a ser desarrollado podrá sufrir durante su ejecución inclusive alteraciones drásticas pero tiene la gran ventaja de poderlo optimizar. En este ítem se debe considerar al personal técnico, administrativo y logístico. El número de personas que actúan en las diferentes actividades del inventario estará en función de la información dasométrica requerida, del modelo de muestreo y de la experiencia del personal participante. Su costo naturalmente variará en función de esas características.

Una distribución detallada sobre responsabilidades, tiempos de ejecución y respectivos costos podrá ser analizada y planificada en los diversos sistemas de organización y control de actividades, como PERT/CPM, programación lineal, análisis multivariada, etc. De cualquier forma recomiendase preparar diagramas que puedan mostrar el orden jerárquico de todas las unidades de ejecución que compongan el inventario.

Para alcanzar el éxito deseado al menor costo posible el personal involucrado en las diversas actividades del inventario deberá estar optimamente organizado y el orden jerárquico de responsabilidades claramente definido.

3. Medios de planificación

La planificación de cualquier inventario forestal comprende la formulación sistemática de un conjunto de decisiones debidamente integradas expresando sus propósitos condicionándolos a los medios de poderlos alcanzar. En consecuencia se podrá definir anticipadamente a través de la planificación cuales serán las medidas necesarias a ser adoptadas para alcanzar las metas propuestas.

Entre los varios métodos existentes que puedan ser aplicados en la planificación de un inventario forestal apenas el sistema PERT/CPM será resumidamente presentado.

La programación lineal es uno de los métodos de la investigación operacional frecuentemente empleado para resolver el problema de la minimización de costos y maximización de beneficios, por tanto muy útil en las actividades de los inventarios forestales. La problemática de la utilización de la programación lineal consiste en crear un juego de m desigualdades lineales o ecuaciones con r variables para calcular los valores no negativos de esas variables que permitan satisfacer las restricciones y consigan optimizar (maximizar o minimizar) alguna relación lineal de esas variables.

El análisis multivariado es una poderosa herramienta para el estudio que trata de varios parámetros observados o medidos sobre un mismo individuo. Este sistema comparado con la red PERT/CPM difiere en la necesidad de contar con datos iniciales conocidos.

3.1 Red PERT/CPM

El sistema PERT/CPM (Program Evaluation Review and Technique / Critical Path Method) traduce en realidad la fusión de dos métodos semejantes pero de orígenes diferentes.

Para los inventarios forestales los instrumentos de planificación PERT/tiempo, PERT/costo y las barras de Gantt toman especial atención, de tal forma que todas las actividades podrán ser planificadas, programadas y controladas.

La red, gráfico o diagrama PERT/CPM es el conjunto de puntos, nudos o vértices denominados eventos o acontecimientos que están relacionados a través de un criterio de correspondencia, constituido de actividades bien definidas.

La aplicación de la red PERT/CPM en los inventarios forestales y sobre todo en aquellos más complejos y extensos permitirá:

- optimizar el tiempo y recursos financieros
- no precisar de datos iniciales
- enorme flexibilidad en la aplicación del método de muestreo.

Las Figuras N° 33 y 34 muestran la aplicabilidad de la red PERT/CPM en un inventario forestal realizado en plantaciones de Eucalyptus sp. en la región central del Brasil. La planificación a través de este sistema se mostró muy eficiente y permitió encontrar deficiencias en la metodología de campo que se corrigieron oportunamente. Debido a la extensa área reforestada, infinidad de datos recolectados y la premisa de obtener resultados conclusivos a corto plazo, ese inventario solo pudo conseguir su objetivo gracias a una cuidadosa y previa planificación.

El cronograma de Gantt-PERT, barras diseñadas horizontalmente (Figura N° 34) permiten identificar claramente la cantidad de trabajo realmente procesado durante cierto periodo de tiempo, tornándolo un instrumento disciplinario para cumplir metas intermedias.

4. Manual de campo

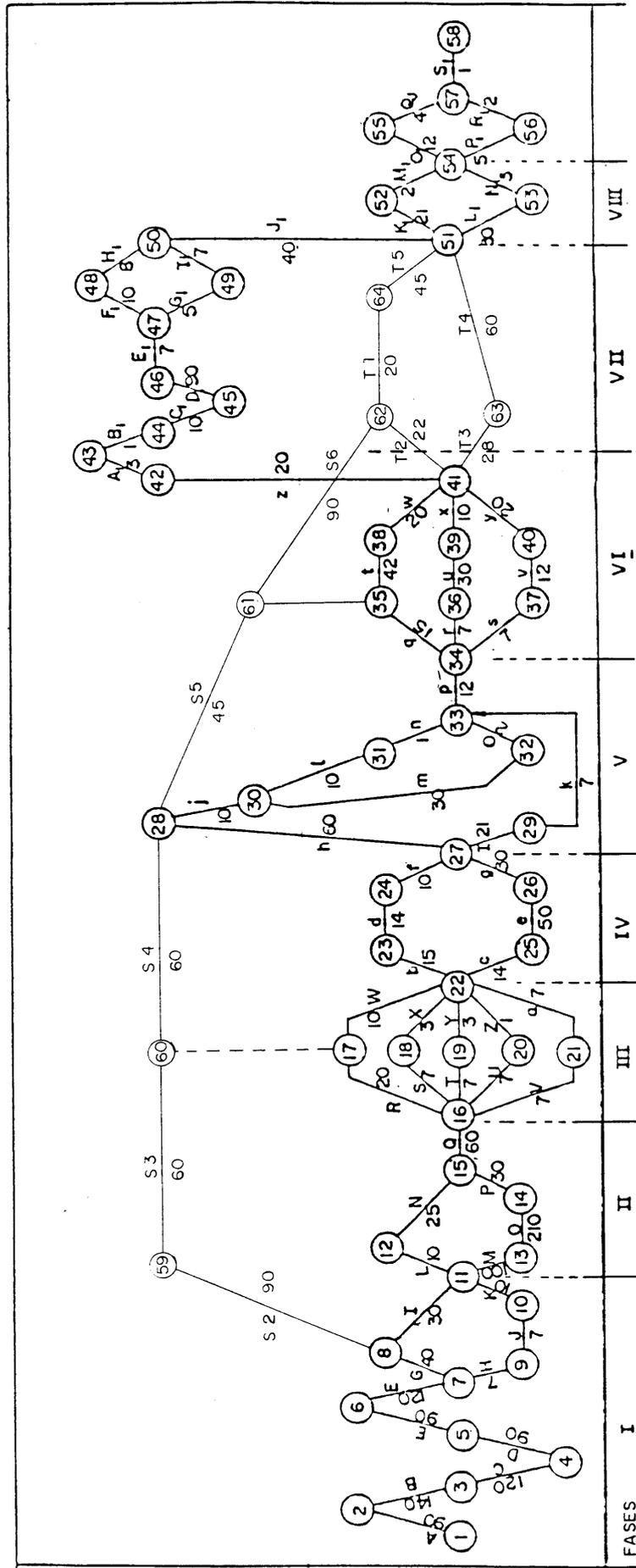
El manual de campo es el documento previamente preparado que contiene detalladamente el procedimiento de ejecución de los trabajos de campo. A toda posible duda que pueda existir se deberá recurrir a ese manual, de tal forma que si las variables son medidas como se indica, existirá una minimización de los posibles errores.

El manual de campo debe estar compuesto básicamente por cinco capítulos principales, referente a:

- a. equipos de campo
- b. establecimiento de la parcela
- c. características de la parcela
- d. medición de las variables
- e. presentación de relatorios.

El número de personas que deberán constituir el o los equipos de campo debe estar claramente definido y sus responsabilidades muy bien identificadas. La experiencia de los inventarios forestales realizados en el Brasil indica que el número óptimo de participantes está entre tres y cinco personas, dependiendo del tipo de bosque y del modelo de muestreo. Otra característica importante es que el personal que deberá participar deba tener previamente una especie de curso preparatorio, mostrándoles la necesidad de seguir rigurosamente la metodología adoptada e indicada en el manual de campo.

Figura 33. Red PERT/CPM aplicado a un inventario forestal



Una vez constituido el equipo o equipos de trabajo se debe considerar el personal logístico (personal de apoyo) a los equipos de medición. En esta categoría se incluyen los choferes, cocineros, coordinador, etc.

Las responsabilidades se refieren a la necesidad de mostrar las atribuciones de cada una de las personas participantes, de tal forma que al técnico le corresponderá obligaciones distintas que de los medidores y estos consecuentemente diferentes de los auxiliares de campo.

La definición de responsabilidades permitirá eliminar una serie de dudas y durante los trabajos de campo cada uno podrá asumir su verdadera función.

Referente al establecimiento de la parcela se torna imprescindible definir la localización y el propio establecimiento de la parcela. Para éste item se hace necesario la existencia de mapas elaborados con bastante grado de detalle de tal forma que cualquier parcela durante y después del inventario pueda ser nuevamente localizada.

Tómese atención de que las parcelas deben seguir siempre una orientación fija definida. Se recomienda crear un sistema de orientación de las parcelas de tal forma que los equipos de trabajo las puedan instalar sin ninguna dificultad. Cuando se trata de parcelas rectangulares o cuadradas uno de los vértices deberá ser considerado como punto de referencia, en parcelas circulares naturalmente el centro del círculo ofrecerá el punto de referencia.

En las características de la parcela se debe identificar su forma geométrica y en función de ella existirá una posibilidad de numeración sistemática de los árboles que se encuentran en esa parcela. Otro asunto importante será la marcación de los árboles sobre todo cuando el inventario irá a producir tablas de producción y estudios adicionales de anatomía, tecnología de la madera, ordenación, etc.

En la marcación visible o invisible de los árboles se debe considerar los puntos de medida de las variables. Por ejemplo la altura del DAP podrá estar marcado en la ropa del medidor o técnico forestal, o se podrá usar una varilla de 1,30 m para identificar ese punto de medida. Otra característica de la parcela podrá ser la declividad del terreno y en ese sentido todas esas características deben estar inscritas en los correspondientes formularios de campo.

Referente a la medición de las variables dendrométricas se debe indicar detalladamente los puntos de medición y naturalmente el procedimiento de medir esas variables. Los instrumentos que serán utilizados y su forma de uso deben estar claramente descritos.

Las unidades de medida también deben estar muy bien definidas de tal forma que los posibles errores de medida estarán minimizados. Antes de iniciar cualquier inventario se recomienda elaborar los formularios de campo en función del objetivo principal del levantamiento y testarlos previamente en algunas parcelas incluyendo situaciones anómalas.

La presentación de los relatorios será el resultado de la correcta transcripción de los formularios de campo. Dependiendo del tipo de información requerida en algunos casos un gráfico podrá mostrar e interpretar mejor los parámetros que varias hojas de texto o tablas numéricas.

VI. INVENTARIO FORESTAL POR FRANJAS DE MUESTREO

Loetsch et.al. (1973) indican que ya en 1881 Brandis en la India fué el primero a utilizar líneas de muestreo de 100 pies de largo (30,40 m). Las parcelas por él empleadas estuvieron marcadas entre sí con varas de bambú a cada 10 pies. Este levantamiento correspondería al primer inventario forestal realizado en bosques tropicales. La diferencia de la metodología usada por Brandis con los modelos actuales está únicamente en que en la época de ese trabajo aún no era posible calcular el error de muestreo.

El objetivo del presente estudio de caso consistirá en mostrar la posibilidad de obtener informaciones cuantitativas y cualitativas del volumen maderable de una área de sabana, localizada en las cercanías de la ciudad de Brasilia (Brasil).

1. Metodología

Referente a la delimitación cartográfica del local de estudio se indica que la vegetación que será representada y analizada cubre una extensión de 75 hectáreas. La tipología de esa vegetación natural corresponde a una estructura arborea de porte medio.

El presente diseño de muestreo define a las franjas de muestreo como unidades básicas estadísticas. Estas franjas podrán estar distribuidas por principios enteramente casualizados o por modelos sistemáticos. Para efecto del presente estudio las franjas de muestreo fueron distribuidas al acaso. El largo de cada línea fue diferente en cada una de ellas como se muestra en la Figura N° 35.

Las unidades de registro estuvieron constituidas por las parcelas de muestreo localizadas en las franjas de muestreo. De hecho las parcelas podrán estar situadas de acuerdo a principios de la probabilidad estadística. Para el caso específico del presente estudio de caso la unidad de registro cubrió una superficie rectangular de 600 metros cuadrados (parcelas de 20 x 30 m) distribuidas sistemáticamente en desigual número por franja de muestreo, de tal forma que el ancho de cada franja fué de 20 m.

Un camino existente que atraviesa el total del área del inventario fué considerada como línea base. En función de esta línea base se diseñó perpendicularmente las franjas de muestreo (superficie a ser inventariada) de las cuales siete líneas fueron sorteadas aleatoriamente.

2. Variables de cálculo

Las variables dendrométricas fueron la circunferencia a la altura del pecho (CAP), circunferencia de base a la altura de 0,20 m (Cb) y la altura total del árbol (H). Fueron considerados apenas los individuos con Cb igual o superior a 20 cm.

Las circunferencias fueron medidas con cintas métricas de 1,50 m y la altura del árbol fué determinada haciendo uso de reglas (miras) topográficas de 4 m e hipsómetro de Weise.

La identificación botánica fué realizada durante el levantamiento de campo y de aquellas especies cuya identificación botánica en el campo no fué posible, se recolectó material verde para posterior envío a un herbario.

3. Análisis estadístico

El cálculo de la fracción de muestreo corresponde a la siguiente expresión:

$$f = a/A$$

a = área realmente inventariada

A = área total del inventario.

$$f = 0,0375$$

intensidade de muestreo = 0,05% del área total.

El cálculo del error de muestreo fué calculado por la formula siguiente (Cossio, 1970):

$$s\bar{q}^2 = \frac{(1-f)q^2}{n(n-1)} \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\bar{x}^2} + \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{\bar{y}^2} - \frac{2 \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\bar{x} \bar{y}} \right]$$

$s\bar{q}^2$ = variancia de muestreo

x_i = área de la franja de muestreo

y_i = volumen por franja de muestreo

n = número de unidades estadísticas

siendo que la proporción q estará definida por:

$$q = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$$

\bar{y} = volumen medio calculado

\bar{x} = promedio del área de muestreo.

4. Resultados y discusión

Fueron escogidas aleatoriamente siete franjas de muestreo. Para el cálculo del volumen de madera se utilizó la fórmula convencional:

$$V = AB * H * ff$$

el factor de forma fué definido en 0,45 (Imaña, 1989). Condición básica fué obtener un error de muestreo no mayor a 10% del valor del volumen con una probabilidad de 95%.

El volumen total calculado fué de 38,3239 metros cúbicos de madeira c/c como se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 15. Parámetros medios calculados

Franja de muestreo	Area basal m ² /ha	Altura m	Volumen m ³ /ha
1	13,332	4,43	37,2467
2	22,341	5,38	48,5967
3	12,824	4,97	32,5083
4	12,998	4,71	38,2400
5	14,979	4,92	32,8350
6	15,133	6,04	44,3083
7	11,288	5,32	35,5250
promedio	14,6992		38,3229

Haciendo uso de la fórmula normal de los límites de confianza:

$$s_{\bar{y}}^2 = \frac{1}{n-1} \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i - \bar{y} \right)^2}{n} \cdot \frac{N-n}{n-1}$$

N = número total de las franjas de muestreo
n = número de las franjas medidas

se obtiene:

$$S_{\bar{y}}^2 = 5,3265$$

y el intervalo de confianza para el volumen a nivel de 0,95% de probabilidad será igual a:

$$PE [38,3229 \pm 5,6474 \text{ m}^3/\text{ha}] 0,95$$

Para el cálculo de la precisión los datos fueron organizados conforme se muestra en el Cuadro N° 16.

Cuadro 16. Resultados de cálculo

Franja de muestreo	área (ha)		volumen (m ³)		Producto x·y
	x	x ²	y	y ²	
1	0,4288	0,1839	15,9714	225,0856	6,8485
2	0,5480	0,3003	26,6310	709,2102	14,5938
3	0,4886	0,2387	15,8836	252,2887	7,7607
4	0,3082	0,0950	11,7856	138,9004	3,3623
5	0,3018	0,0911	9,6078	92,3098	2,8996
6	0,3098	0,9060	13,7267	188,4223	4,2525
7	0,4296	0,1846	15,2615	232,9134	6,5563
n	2,8140	1,1896	108,8676	1839,1304	46,5437
promedio	0,4021		15,5525		

$$S\bar{q}^2 = 34,2834 (7,3568 + 7,6035 - 14,8852)$$

$$S\bar{q}^2 = 34,2834 (0,0751)$$

$$S\bar{q}^2 = 2,5747$$

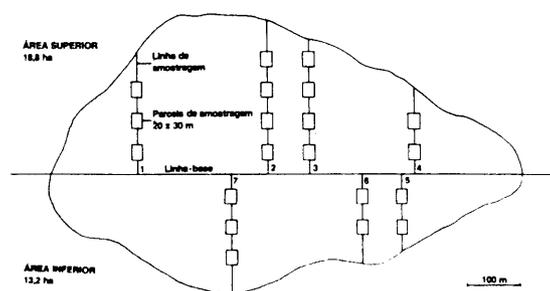
Conocido el error de muestreo que corresponde estadísticamente a la variancia de los parámetros, la precisión del error del modelo será dado por la fórmula siguiente (Cochran, 1963):

$$S\bar{q} \% = \frac{s\bar{q} 100}{q}$$

de tal forma que el desvío medio será de 1,6046 quedando el error de muestreo del modelo en 4,1492 %.

Se concluye que el modelo de muestreo presentado para esa vegetación observada ofrece error de muestreo inferior al esperado (10%), por tanto sus cálculos consecuentes serán satisfactorios en los análisis estadísticos.

Figura 35. Muestras por franjas



VII. INVENTARIO FORESTAL FITOSOCIOLOGICO

El presente estudio de caso pretende mostrar una de las metodologías que examina la situación del momento de la regeneración natural de un bosque en proceso de explotación maderera sustentable. El conocimiento de los padrones de la regeneración natural de los bosques se lo considera imprescindible para el correcto y racional aprovechamiento. Los datos de un inventario fitosociológico permitirán seleccionar los tratamientos silviculturales y el proceso de explotación maderera. Existe una cantidad muy variada de metodologías que procuran obtener esos datos, normalmente conocidos como levantamientos forestales diagnósticos o inventarios forestales fitosociológicos. A seguir será mostrada la problemática y su proceso de evaluación del método malayo con muestreo lineal para la regeneración natural.

1. Ojetivos del estudio de caso

Los objetivos del estudio de caso, levantamiento forestal de la regeneración natural de un bosque tropical húmedo situado en la hoya amazónica, en las proximidades de la región de Tapajós - Brasil (EMBRAPA, 1986), fueron los siguientes:

a. obtener informaciones sobre la distribución, su estado de desarrollo y composición de la regeneración natural de las especies forestales consideradas de mayor valor económico;

b. obtener informaciones sobre la intensidad de la competición por elementos no deseables;

c. verificar la necesidad de aplicar tratamientos silviculturales en el bosque en cuestión.

2. Características del local

El inventario diagnóstico fue restringido a 36 hectáreas. En el área de estudio existió notoriamente una extracción de maderas valiosas de grandes dimensiones y en la época del inventario el bosque observado se presentaba como una consorciación de árboles adultos del bosque original y de la regeneración natural de diversas especies en diversas edades, en gran parte provocada por la explotación selectiva o extrativista de algunas especies realizada en años anteriores.

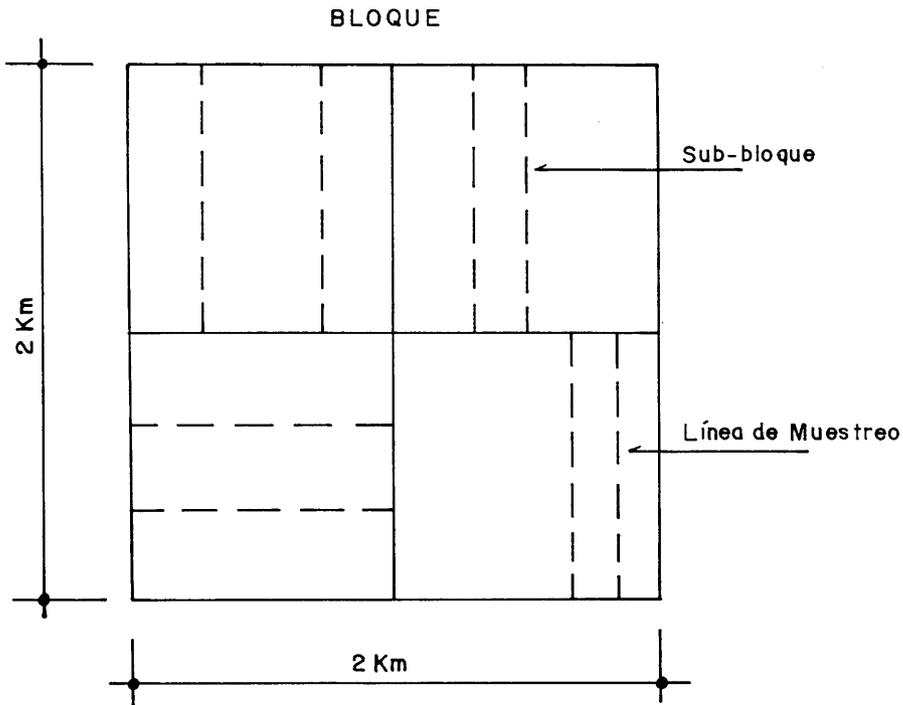
El clima corresponde en su clasificación al tropical húmedo con una precipitación de 2100 mm/año y una temperatura media anual de 25° C.

3. Modelo de muestreo

El modelo utilizado fué el método malayo de muestreo lineal para la regeneración natural descritos por Barnard (1950) y Wyatt-Smith (1960).

El área de estudio (36 hectáreas) fué dividido en 36 parcelas cuadradas de 1 ha/cada una. En cada una de estas parcelas fué sorteada una muestra representada por una franja de 5 x 100 m, siempre en el sentido este-oeste. Cada una de las muestras sorteadas fué dividida en 20 submuestras de 5 x 5 m (Figura N° 36).

Figura 36. Método malayo de muestreo lineal



En las parcelas fueron consideradas solamente las especies deseables. Para este fin será necesario tener a mano una lista inicial previa si posible de todas las especies que se presentan en el área de estudio. Para efectos del trabajo realizado se entendió por especie deseable aquella que pudiese ingresar en el proceso de explotación comercial (aprovechamiento económico asegurado en la venta de la madera).

El conocimiento actual de las características de la madera de las especies naturales, su aceptación real en mercados de consumo hizo que las especies deseables fuesen clasificadas en dos grupos: grupo A = especies con mercado 100% asegurado; grupo B = especies en proceso de introducción en mercados de consumo. Resultados de esta clasificación se muestra en el Cuadro N° 17.

Cuadro 17. Relación de especies comerciales

Grupo A	Grupo B
Alexa grandiflora Ducke	Aiouea sp.
Aniba duckei Kostermans	Aniba sp.
Bagassa guianensis Aubl.	Aspidosperma sp.
Bellutia sp.	Astronium gracile Engl.
Bertholletia exelsa Ducke	Brosimum guianense Aubl.
Bixa arborea Hub.	Brosimum parinarioides Ducke
Bombax globosum Ducke	Clarisia racemosa Ruiz & Pav.
Carapa guianensis Aubl.	Copaifera sp.
Caryocar villosum (Aubl.) Pers.	Couratari oblongifolia Ducke
Cordia bicolor A. Dc.	Diploptropis purpurea
Duguetia sp.	Dipterix odorata Aubl.
Guatteria sp.	Enterolobium schomburgkii Benth.
Hevea sp.	Endopleura uchi Ducke
Iryanthera sp.	Erisma uncinatum Warm.
Parkiamultijuga Benth.	Glycidendron amazonicum Ducke
Sclerolobium crysophyllum P.	Helycostilis pendunculata Ben
Simaruba amara Aubl.	Hymananthus sp.
Sterculia pilosa Ducke	Hymenaea courbaril L.
Tachigalia myrmecophylla Ducke	Hymenaea parviflora Huber
Tapira guianensis Aubl.	Hymenolobium flavum Kleinh.
Virola sp.	Lecythis usitata
Virola melinonii A.C. Smith	Manilkara huberi Standley
Vismia sp.	Maquira sclerophylla C. C. Berg
Vochysia maxima Warm.	Mezilaurus itauba Mez.
	Mezilaurus lindaviana Et. Mez.
	Nemamuma sp.
	Ocotea sp.
	Ormosia sp.
	Pithecelobium racemosum Ducke
	Platymiscum sp.
	Pouteria sp.
	Swartzia stipulifera Harms.
	Symphonia sp.
	Syzyglopsis sp.
	Terminalia argenta Zucc.
	Terminalia obovata Stend.
	Trattinickia sp.

En cada submuestra (25 m²) fueron considerados todos los individuos de las especies deseables desde que tuviesen un DAP menor a 15 cm. Esos individuos fueron distribuidos en clases de altura conforme se muestra en el Cuadro N° 18.

Cuadro 18. Distribución de la regeneración natural

Clase de altura	denominación	símbolo
0 - 30 cm	recluta	R
30 - 150 cm	plántula no establecida	U ₁
150 - 300 cm	plántula no establecida	U ₂
> 300 cm y DAP < 5 cm	plántula establecida	E
DAP de 5 - 10 cm	vara delgada	1A
DAP de 10 - 15 cm	vara media	1B

3.1 Proceso de medición

Cada equipo de trabajo fué constituido de tres personas (uno de ellos dendrólogo) y durante el periodo de ejecución fué registrado el rendimiento diario debido a que por primera vez se realizaba un inventario forestal de esa naturaleza. El rendimiento medio diario fué de 1,5 submuestras en 42 días efectivos de trabajo de campo.

Las parcelas quedaron diseñadas en un mapa base donde se demarcó los puntos visibles de referencia. En base de esos puntos fué posible localizar las franjas de muestreo escogidas aleatoriamente.

Las franjas (500 m²/cada una) en cada parcela sorteada también fué escogida aleatoriamente. En cada franja sorteada se abrió una picada central y en función de esa línea fue colocada una estaca numerada a cada 5 metros, de tal forma que las subparcelas pudieron ser fácilmente encontradas y medidas. La delimitación de la parcela se produjo utilizando varas de bambú de 2,5 metros y en esa forma se pudo trabajar en dos lados bien delimitados (norte y sur) de la submuestra.

Utilizando formularios apropiados fueron contadas todas las plántulas existentes en la submuestra y clasificadas de acuerdo a los grupos A y B de las especies deseables.

Para cada clase de la distribución de la regeneración natural fué seleccionada la plántula líder de los grupos A y B y las plántulas de sustitución para cada grupo. Las plántulas líder fueron escogidas tomando en cuenta la altura correspondiente a cada clase, características de forma, posición de la lista convencional de especies y la probabilidad de que pueda emerger (crecimiento natural asegurado).

Las plántulas de sustitución correspondieron a los individuos escogidos como substitutos de las plántulas líder para cada grupo. Las plántulas escogidas fueron rigurosamente medidas en altura total y diámetro de base y existiendo el DAP también fué medido.

3.2 Proceso de cálculo

Siguiendo las recomendaciones de la FAO (1971) con los datos obtenidos en el campo se realizó el cálculo correspondiente al índice de almacenamiento, del factor de establecimiento y del índice de competición.

La frecuencia de cada especie fué determinada a través de la relación porcentual entre el número de submuestras en que la especie se encontraba y el número total de las submuestras.

A una submuestra se la considera con almacenada si en ella se encuentra por lo menos una plántula de las especies deseables en la clase E (Cuadro N° 18) y su valor será calculado por:

$$100 R = 10 (U_1 + U_2) = un E$$

Desde el momento que en la submuestra exista un ejemplar de E las plántulas de las clases inferiores no se tomarán más en cuenta para el cálculo correspondiente del índice de almacenamiento (I.A.).

El índice de almacenamiento debe ser calculado para cada grupo (A y B) y para el total de la población (A + B). En cualquiera de esos niveles el valor máximo del I.A. por submuestra no podrá ser superior a 1 (uno), de tal forma que:

$$F.E. = \frac{\sum s}{N_t} \cdot 100$$

donde s = el valor del I.A. de cada submuestra
 N_t = número total de las submuestras.

El factor de establecimiento (F.E.) será calculado por la siguiente fórmula:

$$F.E. = \frac{N_s}{N_t} \cdot \frac{A_t}{A_e} \cdot 100$$

donde N_s = número de las submuestras con $s = 1$
 A_t = altura media de las plántulas líder
 A_e = altura convencional de establecimiento

La altura convencional para el estudio fué establecido en 3 metros, de tal forma que todas las plántulas con altura superior a 3 m serían consideradas para el cálculo de A_t y en consecuencia el valor de A_t sería siempre inferior al de A_e .

4. Resultados

El Cuadro N° 19 presenta los resultados de los cálculos referentes al índice de almacenamiento (I.A.) y al factor de establecimiento (F.E.) extrapolados a las 36 hectáreas.

Cuadro 19. Índice de stock y factor de establecimiento del área inventariada

Grupo de especies	x	I.A. (%)		x	F.E. (%)		FE/IA %
		sx	CV		sx	CV	
A	57,0	2,3	24,0	37,5	2,9	44,2	58,9
B	68,0	2,2	19,9	46,0	3,0	39,3	67,3
A + B	88,0	1,6	10,7	72,0	2,9	20,6	78,0

El concepto del almacenamiento se refiere a la concentración de los árboles de especies valiosas que podrán alcanzar dimensiones de corte al final de la rotación. 57% y 88% para el grupo de especies A y (A + B) respectivamente es considerado satisfactorio tomando en cuenta que 40% para una población o 50% para el conjunto de poblaciones son valores considerados como aceptables según la literatura clásica (FAO, 1971).

Esa aceptación satisfactoria indica que la regeneración natural de las especies esta consolidada. Valores inferiores recomendarán urgentes acciones de ordenamiento a fin de orientar el crecimiento de la regeneración natural.

Los coeficientes de variación (CV) del índice de almacenamiento relativamente bajos hacen suponer una distribución del estock sin diferencias significativas entre las submuestras.

El factor de establecimiento (F.E.) es una medida del desarrollo de la altura de la regeneración natural. Cuanto más próximo estuviese F.E. del valor correspondiente del índice de almacenamiento mayor será la altura media de la plántula lider de cada submuestra.

La relación F.E./I.A. indicará las cantidades correspondientes de submuestras que contengan plántulas equivalentes a la clase E. Por tanto para el resultado presentado se afirma que las especies deseables están establecidas en franca disposición de ingresar a las clases 1A y 1B.

La frecuencia de las especies mostrará la posición de ocurrencia de las especies (mas o menos valiosas). Valores altos confirmarán su distribución en toda al área del inventario.

4.1 Conclusiones generales

Sin entrar en detalle de las conclusiones específicas del estudio de caso se pretende mostrar la necesidad de efectuar inventarios diagnósticos o fitosociológicos principalmente en regiones donde existe actividad de explotación maderera.

Inventarios realizados por períodos de tres en tres o de cinco en cinco años en una misma región permitirá comprender el desarrollo de la regeneración natural y en función de esos resultados el plan de ordenación y manejo de esos bosques considerando los parámetros encontrados, ciertamente permitirá un rendimiento racional y sustentable.

Experiencias realizadas en el Brasil muestran que estos inventarios fitosociológicos una vez bien planificados pueden ser ejecutados desde su inicio a la presentación de los relatorios correspondientes en períodos de 8 a 10 meses permitiendo a las empresas madereras realizar optimización técnica y de rendimientos económicos.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BARNARD, R.C. Linear regeneration sampling. The Malaysian Forester (Kuala Lumpur) 13(3):129-35. 1950
- BRUCE, D. y SCHUMACHER, F.X. Forest mensuration. 3 ed. New York, McGraw-Hill, 1950. 483p.
- COCHRAN, W. Sampling techniques. 2ed. New York, Wiley, 1963. 549p.
- COSSIO, G. Diseño de inventario y cálculo de precisión. Notas Técnicas, Bogota (Colombia) 1(4):21-30. 1970
- DRAPER, N.R. y SMITH, A. Applied regression analysis. New York, Wiley, 1966. 526p.
- FAO. Silvicultural research in the Amazon. Roma, 1971. 192p.
- FREESE, F. Elementary forest sampling. Washington, USDA Forest Service, 1962. 91p. (Agriculture Handbook, 232)
- FURNIVAL, G.M. An index for comparing equation used in construction volume tables. Forestry Science 7(4): 337-341. 1961
- HUSCH, B. Planificación de un inventario forestal. Roma, FAO, 1971. 135p. (Estudios de Silvicultura y Productos Forestales, 17)
- HUSCH, B.; MILLER, Ch.I.; BEERS, T.W. Forest mensuration. 2 ed. New York, Wiley, 1972. 410p.
- IMAÑA, J. Cálculo do coeficiente de volume no cerrado grosso de Brasília. Pesquisa Agropecuária Brasileira (Brasília) 24(12):1457-1459. 1989
- IMAÑA, J. Conceitos básicos sobre inventários florestais. Brasília, UnB/EAG, 106p. 1978
- IMAÑA, J. Estabelecimento das parcelas permanentes para o inventário florestal contínuo dos reflorestamentos no Estado de Goiás e Distrito Federal. Brasília, UnB/EAG, 1981. 43p.
- IMAÑA, J. Inventario florestal por faixas de amostragem. Pesquisa Agropecuária Brasileira (Brasília) 26(1):25-30. 1991

- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. In-ventário florestal nacional, reflorestamento, Minas Gerais. Brasília, 1984a. 125p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. In-ventário florestal nacional, reflorestamento, Paraná e Santa Catarina. 1984b. 283p.
- LANLY, J.P. Manual de inventarios forestales con especial referencia a los bosques mixtos tropicales. Roma, FAO, 1974. 195p.
- LOETSCH, F. y HALLER, K.E. Forest inventory. Munich (Alemania), BLV, 1964. 436p. v.1.
- LOETSCH, F.; ZOEHRER, F.; HALLER, K.E. Forest inventory. Munich (Alemania), BLV, 1973. 469p. v.2.
- MACKAY, W.B. Dasometria; teoria y técnica de las mediciones forestales. Madrid, 1964
- MALLEUX, J. Estratificación forestal con uso de fotografías aéreas. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina, Departamento de Manejo Forestal, 1971. 82p.
- MEYER, H.A. A correction for systematic error occurring in the application of the logarithmic volume equation Pennsylvania (USA), Forest School Research, 1941. 3p.
- PRODAN, M. Holzmesslehre. Frankfurt a.M. (Alemania), Sauerlaender's Verlag, 1965. 644p.
- SPEIDEL, G. Organização e administração florestal. Curitiba (Brasil), Universidade Federal do Paraná, Departamento Engenharia Florestal, 1977. 80p.
- SPURR, S.T. Forest inventory. New York, Ronald Press, 1952. 476p.
- WYATT-SMITH, J. Diagnostic linear sampling of regeneration. The Malaysian Forester (Kuala Lumpur) 23(3): 191-202. 1960
- YOUNG, H.E. The complete tree concept - a challenge and an opportunity. Proceeding of the 1964 annual meeting of the Society of American Foresters pp. 231-233.
- YOUNG, H.E. y TRYON, Th.C. A national forest biomass inventory. Bucarest, IUFRO - Proceedings, 1978.

A N E X O S

Anexo N° 1. Resultados del Ejercicio N° 2

a. 674260 pulgadas ²	= 0,0435 hectárea
	= 4682,5237 pies cuadrados
b. 674,26 pies tablares	= 3,8163 metros cúbicos
	= 134,77114 pies cúbicos
c. 67,426 hectáreas	= 674260 metros cuadrados
	= 7257734,6 pies cuadrados
d. 67,426 hectáreas	= 166,6097 acres
	= 0,260332 millacuadrada
e. 67426 pies cúbicos	= 1909504320 cm cúbicos
	= 1909,5043 metros cúbicos
f. 6742,6 cuerdas	= 17186,8874 metros cúbicos
	= 606946,335 pies cúbicos
g. 6742,6 pies ²	= 6263875,4 centímetros cuadrados
	= 0,0626389 hectárea
h. 674,26 acres	= 272,87302 hectáreas
	= 2728730,2 metros cuadrados
i. 6742,6 pulgadas ²	= 43500,558 centímetros cuadrados
	= 5,2026 yardas cuadradas
j. 67,426 hectáreas	= 2,7286 cadenas

Anexo N°2. Tabla de correspondencia para la construcción de la Regla de Biltmore

s = 56 cm		s = 65 cm	
d cm	CD cm	d cm	CD cm
2	1,96	2	1,97
4	3,86	4	3,89
6	5,70	6	5,74
8	7,48	8	7,55
10	9,21	10	9,31
12	10,09	12	11,03
14	12,52	14	12,70
16	14,41	16	14,33
18	15,66	18	15,93
20	17,17	20	17,49
22	18,64	22	19,02
24	20,08	24	20,51
26	21,49	26	21,94
28	22,86	28	23,41
30	24,21	30	24,82
32	25,53	32	26,20
34	26,82	34	27,55
36	28,09	36	28,88
38	29,33	38	30,19
40	30,55	40	31,47
42	31,75	42	32,74
44	32,93	44	33,98
46	34,08	46	35,20
48	35,22	48	36,40
50	36,34	50	37,59
52	37,44	52	38,76
54	38,53	54	39,91
56	39,60	56	41,04
58	40,65	58	42,16
60	41,69	60	43,27
62	42,71	62	44,35
64	43,72	64	45,43
66	44,72	66	46,49
68	45,70	68	47,54
70	46,67	70	48,57

Anexo N° 3. Resultado del Ejercicio N° 4

$$\begin{aligned} D &= 24 \text{ cm} \\ d &= 18 \text{ cm} \end{aligned} > 21 \text{ cm}$$

Area medida:

$$S_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D + d}{2} \right)^2 = 346,3606 \text{ cm}^2$$

Area de la elipse:

$$S_2 = \frac{\pi}{4} (D \cdot d) = 339,2920 \text{ cm}^2$$

Error:

$$E = \frac{(D - d)^2}{4 Dd} \cdot 100 = 36/1728 = 2,08\%$$

$$E = \frac{S_1 - S_2}{S_2} = \frac{346,3606 - 339,292}{339,292} \cdot 100 = 2,08\%$$

2. Circunferencia correspondiente a 21 cm de diámetro

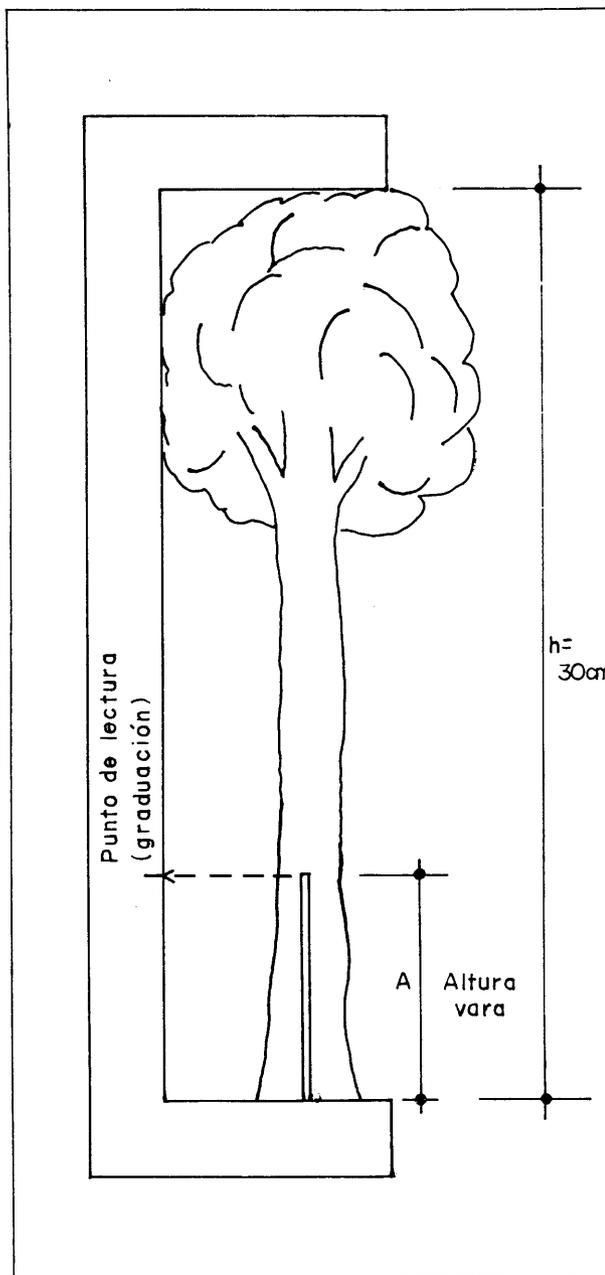
$$C = \pi \cdot 21 \text{ cm}$$

$$C = 65,97 \text{ cm}$$

Anexo N°4. Ejemplo de graduación para la construcción del Hipsómetro de Christen

A = 3m	
L (m)	a (cm)
3,0	30,0
4,0	22,5
5,0	18,0
6,0	15,0
7,0	12,9
8,0	11,2
9,0	10,0
10,0	9,0
11,0	8,2
12,0	7,5
13,0	6,9
14,0	6,4
15,0	6,0
16,0	5,6
17,0	5,3
18,0	5,0
19,0	4,7
20,0	4,5
21,0	4,3
22,0	4,1
23,0	3,9
24,0	3,7
25,0	3,6
26,0	3,5
27,0	3,3
28,0	3,2
29,0	3,1
30,0	3,0

Figura 37. Visualización de la lectura de altura a través del hipsómetro de Christen



Anexo N° 5. Cálculo del volumen de madera según la fórmula de Smalian. Resultados parciales del Ejercicio N° 14.

volumen de las secciones en metros cúbicos

Secc.	Arbol 1	Arbol 2	Arbol 3	Arbol 4	Arbol 5
1	0,047731	0,038897	0,022276	0,030356	0,010564
2	0,039437	0,029294	0,017092	0,022040	0,007471
3	0,035005	0,026451	0,015954	0,020771	0,006725
4	0,031583	0,024892	0,014854	0,019857	0,006019
5	0,028392	0,023376	0,013794	0,018758	0,005351
6	0,025315	0,022170	0,012773	0,017325	0,004723
7	0,023647	0,020874	0,011886	0,016179	0,004189
8	0,022567	0,019610	0,011034	0,015071	0,003588
9	0,021390	0,018511	0,010036	0,014106	0,002930
10	0,019741	0,016542	0,009081	0,013277	0,002383
11	0,018270	0,014534	0,008257	0,012375	0,001930
12	0,017322	0,013083	0,007108	0,011135	0,001528
13	0,016294	0,009317	0,006019	0,009945	0,001142
14	0,014242	0,006019	0,004762	0,008999	0,000835
15	0,011627	0,005351	0,003112	0,007572	
16	0,009043	0,004122	0,002056	0,005836	
17	0,007101	0,002712	0,001221	0,004072	
18	0,005893	0,001557		0,002540	
19	0,004199	0,000699		0,001610	
20	0,002580				
21	0,001503				
	0,402825	0,298011	0,171315	0,251824	0,059378

Secc.	Arbol 6	Arbol 7	Arbol 8	Arbol 9
1	0,015090	0,027057	0,025761	0,037277
2	0,010670	0,021402	0,019488	0,031899
3	0,009427	0,018889	0,018508	0,028261
4	0,008419	0,016533	0,017559	0,024618
5	0,007551	0,014854	0,016294	0,022059
6	0,006726	0,013794	0,014754	0,016201
7	0,006222	0,012292	0,012985	0,016762
8	0,005747	0,010670	0,011045	0,014859
9	0,005095	0,009344	0,009427	0,013090
10	0,004313	0,008257	0,007184	0,011506
11	0,003635	0,007108	0,004695	0,009798
12	0,003220	0,006019	0,003434	0,006539
13	0,002786	0,004251	0,002377	0,004025
14	0,002258	0,002395	0,001349	0,002414
15	0,001610	0,001610		
16	0,001110			
	0,093702	0,174450	0,164860	0,239308
