

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

# COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE MUESTREO EN INVENTARIO FORESTAL

por

Jorge CÁMPORA  
Martín TERRA

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO  
URUGUAY

2008

Tesis aprobada por:

Director: .....

Rafael ESCUDERO

.....

Juan CABRIS

.....

Guillermo MORÁS

Fecha: Montevideo, 27 de enero de 2007.

Autor: .....

Jorge CÁMPORA

Autor: .....

Martim TERRA

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias, especialmente a nuestros padres por el esfuerzo realizado durante todos estos años y por el apoyo incondicional en todas las etapas de la carrera.

A Viviana y Virginia por la ayuda brindada en gran parte de nuestra formación.

A los directores de esta tesis, Ing. Agr. Rafael Escudero, Ing. Agr. Juan Cabris e Ing. Agr. Guillermo Morás, por ser la guía para este trabajo y por el tiempo invaluable que le dedicaron.

Al personal de Tile Forestal S.A. y sus contratistas por el apoyo brindado tanto en las oficinas como en el campo.

Al Ing. Agr., Ph.D. José Alfredo Terra por la orientación brindada en la realización del presente trabajo.

A Marquitos por la ayuda en el trabajo de campo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
I. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
II. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
A. DEFINICIÓN DE INVENTARIO FORESTAL.....	2
B. CONCEPTO DE MEDICIÓN.....	2
C. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE UN ÁRBOL.....	2
1. <u>Mediciones en árboles en pie</u> .....	3
a. Medición de diámetros.....	3
b. Medición de alturas.....	4
2. <u>Mediciones en árboles apeados</u> .....	5
a. Factor de Forma.....	5
b. Medición de corteza.....	6
D. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN EN POBLACIONES FORESTALES.....	7
1. <u>Unidades muestrales</u> .....	7
a. Tamaño de muestra.....	8
b. Forma y tamaño de las parcelas.....	9
E. MÉTODOS DE MUESTREO UTILIZADOS.....	11
1. <u>Muestreo Bitterlich</u> .....	11
a. Principios del método.....	11
b. Elección del factor de área basal (FAB).....	12
c. Ventajas del muestreo Bitterlich.....	13
d. Desventajas del muestreo Bitterlich.....	14
2. <u>Muestreo Aleatorio Simple (MAS)</u> .....	14
a. Principios del método.....	14
b. Ventajas del MAS.....	15
c. Desventajas de MAS.....	15
3. <u>Muestreo Sistemático (MS)</u> .....	16
a. Principios del método.....	16
b. Ventajas del MS.....	17
c. Desventajas de MS.....	17
F. ANTECEDENTES DE TIEMPO.....	17
G. OPTIMIZACIÓN DE INVENTARIOS.....	18
1. <u>Análisis de errores en inventarios</u> .....	19

a.	Errores no muestrales.....	20
III.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS.....</u>	24
A.	MATERIALES.....	24
1.	<u>Características del rodal.....</u>	24
2.	<u>Características del sitio.....</u>	24
3.	<u>Instrumentos utilizados.....</u>	25
B.	MÉTODOS.....	26
1.	<u>Metodología Bitterlich.....</u>	28
2.	<u>Muestreo Aleatorio y Sistemático.....</u>	29
3.	<u>Determinación del factor de forma.....</u>	31
a.	Muestreo Aleatorio simple y Muestreo Sistemático.....	31
b.	Muestreo Bitterlich.....	33
4.	<u>Toma de tiempos.....</u>	33
IV.	<u>RESULTADOS Y DISCUSION.....</u>	34
A.	ANÁLISIS DE TIEMPO.....	34
B.	FACTOR DE FORMA.....	38
1.	<u>Factor de forma comercial usando altura comercial.....</u>	38
2.	<u>Factor de forma comercial usando altura total.....</u>	40
C.	COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE MUESTREO.....	42
1.	<u>Comparación entre todos los muestreos.....</u>	42
2.	<u>Muestreo Bitterlich; estimación de volúmenes con diferentes factores de forma.....</u>	45
3.	<u>Muestreo Bitterlich con diferentes intensidades de muestreo.....</u>	47
4.	<u>Métodos de muestreo con diferentes estimadores de factor de forma.....</u>	49
D.	CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA.....	51
V.	<u>CONCLUSIONES.....</u>	53
A.	CONCLUSIONES.....	53
B.	RECOMENDACIONES.....	54
VI.	<u>RESUMEN.....</u>	57
VII.	<u>SUMMARY.....</u>	59
VIII.	<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	61
IX.	<u>ANEXOS.....</u>	63

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Numero de árboles a medir para el cálculo del factor de forma según clase diamétrica.....	31
2. Tiempo promedio insumido por etapa en el muestreo Bitterlich..	34
3. Tiempo promedio insumido por etapa en el muestreo sistemático.....	35
4. Tiempo promedio y total de búsqueda y medición de la parcela según método de muestreo.....	37
5. Factor de forma comercial usando altura comercial según clase diamétrica.....	39
6. Factor de forma comercial usando altura total según clase diamétrica.....	41
7. Tabla de existencias en pie del rodal usando factor de forma comercial de altura comercial (FFcc) según tipo de muestreo....	43
8. Resultado de la Prueba de Tukey en SAS para los volúmenes comerciales de los muestreos. Comparación de 3 tratamientos...	43
9. Tabla de existencias en pie del rodal usando factor de forma comercial de altura total (FFct) según tipo de muestreo.....	44
10. Resultado de la Prueba de Tukey en SAS para los volúmenes comerciales usando FFcc y FFct según método de muestreo. Comparación de 6 tratamientos.....	44
11. Tabla de existencias en pie del rodal según factor de forma utilizado en muestreo Bitterlich. Comparación de 5 tratamientos	46
12. Coeficiente de variación del volumen y error de muestreo según factor de forma comercial usando altura comercial utilizado en muestreo Bitterlich.....	47
13. Volúmenes promedio por hectárea e intervalos de confianza según intensidad de muestreo en muestreo Bitterlich.....	47
14. Tabla de existencias en pie promedio del rodal, sus intervalos de confianza y errores de estimación según intensidad de muestreo en muestreo Bitterlich.....	48
15. Tratamientos comparados mediante ANAVA, volúmenes comerciales de todos los muestreos usando todos los factores de forma.....	49

16. Comparación de volúmenes comerciales de nueve tratamientos de calculo (diferentes métodos de muestreo y factores de forma).....	50
17. Caracterización cuantitativa por árbol, por hectárea y total del rodal según tipo de muestreo.....	51

Figura No.

1. Croquis de ubicación de la plantación.....	26
2. Grilla de puntos superpuesta sobre el mapa del rodal.....	27
3. Distribución de las parcelas en el muestreo Bitterlich.....	28
4. Distribución de las parcelas en el muestreo Sistemático.....	29
5. Distribución de las parcelas en el muestreo Aleatorio Simple....	30

Gráfico No.

1. Tiempo promedio insumido por etapa en Muestreo Bitterlich.....	35
2. Tiempo promedio insumido por etapa dentro de cada parcela en el muestreo Bitterlich.....	35
3. Tiempo promedio y total insumido por etapa en el muestreo sistemático.....	36
4. Tiempo promedio insumido por etapa dentro de cada parcela en los muestreos sistemático y aleatorio.....	37
5. Tiempo promedio por etapa y tiempo total según método de muestreo.....	38
6. Relación entre el <i>DAP</i> y el factor de forma comercial usando altura comercial (FFcc).....	40
7. Relación entre el <i>DAP</i> y el factor de forma comercial usando altura total (FFct).....	41
8. Relación entre el <i>DAP</i> y el porcentaje de corteza según clase diamétrica.....	42
9. Volumen comercial por hectárea según método de muestreo y factor de forma utilizado.....	45
10. Error de muestreo en % según intensidad de muestreo en Bitterlich.....	48
11. Altura total en función del <i>DAP</i> .....	52



## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el sector forestal se encuentra en una etapa muy dinámica en el Uruguay. Hasta el año 2003, último dato oficial, el país contaba con 670421 hectáreas de bosques artificiales implantados bajo proyecto, de las cuales 474076 ha (70.8% del área) correspondía a plantaciones con especies del género *Eucalyptus*, 190303 ha (28,4 % del área) eran ocupadas por especies del género *Pinus* y el resto de la superficie, 6042 ha (0.9 % del área), estaba destinada principalmente a Salicáceas.

Paralelamente a esta gran expansión del área forestada, aparece asociado el sector industrial creciendo a un ritmo exponencial. Este hecho trae aparejado una necesidad de contar con procesos de producción bien definidos y organizados, en los cuales la planificación y coordinación de las actividades se vuelven fundamentales. La planificación y ejecución de inventarios forestales es parte importante de este sistema, ya que con éstos podemos obtener información cualitativa y cuantitativa de los rodales, de mucho valor para múltiples usos. La determinación del volumen de madera de un rodal es un ejemplo de ello, siendo uno de los parámetros más importantes.

Conocer la madera en pie de un rodal permite planificar y organizar las operaciones de cosecha y toda la logística involucrada así como elaborar planes de manejo. También es fuente de información muy importante para la industria y en transacciones comerciales.

Dada la importancia de los inventarios forestales, es necesario contar con métodos de muestreo eficientes, tanto en la estimación de volumen como en los costos y tiempo de realización de los mismos.

El siguiente trabajo tiene como **objetivos**:

- 1) comparar diferentes métodos de muestreo de plantaciones forestales según su eficiencia en la estimación de parámetros poblacionales.
- 2) comparar diferentes métodos de muestreo de plantaciones forestales, evaluando la eficiencia de uso del tiempo de muestreo.

## **II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **A. DEFINICIÓN DE INVENTARIO FORESTAL**

Sorrentino (1997) define al inventario forestal como la descripción cualitativa y cuantitativa de los componentes de un área ocupada por bosques, por lo que en general incluye información sobre la cantidad y calidad de los productos del mismo. Esto implica tanto características correspondientes a los árboles, en cuanto a sus dimensiones dendrométricas, como al conjunto de individuos desde el punto de vista dasométrico, en relación al área que estos ocupan y a las condiciones del medio físico en que se desarrollan.

Loetsch et al. (1973) definen en breve el inventario forestal como las técnicas para recolectar información satisfactoria y confiable de los bosques al menor costo posible.

### **B. CONCEPTO DE MEDICIÓN**

Prodan et al. (1997) expresan que toda medición implica la comparación de un elemento u objeto con un patrón estándar. Cualquier determinación de características tipo de un individuo o de un conjunto de individuos es considerada una medición cuando existe un contacto entre el instrumento y el objeto, contacto que puede ser físico, óptico o de otra naturaleza. En este sentido, debe diferenciarse entre mediciones y estimaciones, ya que este último concepto se aplicará a la determinación de un valor o dimensión mediante un estimador, que también es un instrumento, pero de tipo estadístico-matemático.

Según Bruce et al. (1965) la medición o mensura forestal trata de la determinación de diámetros, alturas y volúmenes de árboles en pie o de sus productos.

### **C. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE UN ÁRBOL**

La determinación de volúmenes de árboles enteros puede realizarse a través de mediciones de árboles en pie, o a partir de medidas sobre los árboles apeados, utilizando las fórmulas básicas de cubicación, Smalian, Huber o Newton (Sorrentino, 1997).

Para Bruce et al. (1965) el método más preciso para medir el volumen de cualquier sólido de forma irregular consiste en medir el volumen de agua que desplaza, aunque solo sirve para la medición de trozas y no puede usarse en árboles en pie.

## **1. Mediciones en árboles en pie**

### **a. Medición de diámetros**

El diámetro a la altura del pecho (DAP) corresponde al diámetro a 1.30 m del nivel del suelo, excepto en situaciones de fustes torcidos, bifurcados, con anomalías, inclinados, terrenos con pendiente y otros aspectos; en este sentido son muchos los autores que coinciden como ser Husch, Loetsch et al., Bruce et al., Avery, Prodan et al., Sorrentino, citados por Díaz Moreno et al. (1998).

Prodan et al. (1997) en su trabajo expresan que la medición de diámetros es la operación más sencilla de la mensura forestal, pero no por ello debe descuidarse, ya que si la medición tiene un determinado error, el correspondiente error en el área basal es el cuadrado, debido a la fórmula de cálculo de dicha área:

$$AB = (\pi/4) * DAP^2$$

Como la verdadera forma de la sección transversal en tallos leñosos rectos, verticales y de baja conicidad se ubica entre el círculo y la elipse, se recomienda medir dos diámetros perpendiculares y trabajar con el promedio aritmético de ambos (Bruce et al. 1965, Sorrentino 1997, Prodan et al. 1997).

Los instrumentos usados comúnmente para la medición de diámetros, son los siguientes:

#### 1) De medición directa:

Regla (solo para árboles derribados)

Forcípula común

Forcípula finlandesa

Cinta diamétrica

Barra Biltmore

## 2) De medición indirecta:

Forcípula de tarifa o sector de diámetro de Bitterlich  
Dendrómetros y forcípulas ópticas

Las ventajas relativas de cada instrumento dependen de varias circunstancias, como la posición y el estado de la parte del árbol que se vaya a medir, el grado de precisión requerido y la facilidad de transporte, etc. De todos estos instrumentos o materiales con los cuales se puede medir diámetros, la forcípula común es el instrumento más apropiado y práctico para medir DAP (Husch 1963, Avery 1967, Sorrentino 1997).

Bruce et al. (1965) sostienen que para obtener una medida precisa, la forcípula debe aplicarse en forma apropiada, o sea que se debe apoyar con el plano de la escala perpendicular al eje que se va a medir, y sus brazos deben estar absolutamente paralelos. El mismo autor señala algunas desventajas de la forcípula, como ser: 1) es inexacta cuando está desajustada (brazos no están paralelos o están flojos); 2) aquellas con tamaño suficiente para medir árboles muy gruesos son difíciles de portar y manejar; 3) el brazo deslizable puede trabarse si la escala está húmeda o sucia.

### **b. Medición de alturas**

Sorrentino (1994) resalta la importancia de la medición de altura, ya que la misma constituye una variable básica para el cálculo de volumen e incremento volumétrico, además de ser la altura dominante un buen indicador de calidad de sitio.

Para Loetsch et al. (1964), Sorrentino (1997), la altura del árbol en pie se define tanto desde el suelo hasta el tope (altura total), como en largos útiles de diferentes secciones, teniendo en cuenta además, que con el aprovechamiento integral del árbol, del mismo fuste se obtienen combinaciones de varios productos comerciales. Esto determina que no pueda definirse una altura comercial única, sino largos comerciales hasta determinados diámetros críticos, desde la base utilizable hasta el mínimo diámetro crítico del fuste comercial, teniendo en cuenta además el aspecto de conformación o rectitud del mismo.

De los instrumentos para la medición de alturas nombrados a continuación, Sorrentino (1994) señala que algunos presentan limitaciones para determinados fines y que los instrumentos de fabricación propia basados en principios geométricos, en general, permiten tener una aproximación a la verdadera altura.

Bitterlich (1984) destaca que entre los múltiples usos del relascopio, es efectivo para la medición de alturas.

Dada la dificultad de emplear instrumentos de contacto o de medición directa, se usan en general instrumentos de tipo óptico basados en principios geométricos y trigonométricos (Prodan et al., 1997).

## **2. Mediciones en árboles apeados**

### **a. Factor de forma**

Según Prodan et al. (1997) el factor de forma (FF) es un factor de reducción del volumen del cilindro al volumen real del árbol. Las variaciones en la forma de los árboles tienen un impacto menor en el volumen que la variación en altura o diámetro. En un rodal, la relación entre la altura de los árboles y el factor de forma es más estrecha que con el diámetro, o sea que si se deja constante el diámetro y se aumenta la altura se afecta de manera más significativa al FF que si se deja constante la altura y se varía el diámetro.

Bruce et al. (1965) señalan que la forma aproximada de muchas trozas es la de un paraboloides truncado, que tiene como características su contorno longitudinal ligeramente convexo y la superficie de su sección transversal que, en un punto intermedio entre sus extremos, es exactamente el promedio de las superficies de esos extremos.

Si el tronco tiene exactamente la forma de un paraboloides truncado, las fórmulas de Smalian y de Huber darán idénticos resultados. Con más frecuencia se emplea la fórmula de Smalian, que tiene como ventaja principal la facilidad de medición de los extremos cortados transversalmente al eje del árbol.

La fórmula de Smalian o de áreas terminales (transversales al eje de las trozas) cubica correctamente el paraboloides y el cilindro, pero sobreestima el cono y el neiloide. Por esta razón los autores proponen cubicar la troza basal en trozas más cortas como forma de disminuir el error (Prodan et al., 1997).

Clutter et al. (1983) expresan que en algunas especies la forma es relativamente constante e independiente del tamaño de los árboles. En cambio, existen otras en que la

forma de los árboles está a menudo correlacionada con el tamaño de los mismos de modo que diámetro y altura explican gran parte de la variación del volumen causada por la forma.

Según Sorrentino (1994), en poblaciones coetáneas, cuanto menor es la edad de los individuos y menor es la clase de diámetros, más alto es el factor de forma.

Sorrentino (1994), Prodan et al. (1997) coinciden que en coníferas y latifoliadas que crecen bajo condiciones de alta densidad, el FF comercial decrecerá lenta pero constantemente con el aumento del diámetro.

#### **b. Medición de corteza**

Pese a que la corteza tiene ciertos usos marginales para diversos productos comerciales, en la mayoría de los casos es un desecho no aprovechable, por lo que debe descontarse en el cálculo de volumen neto de árboles y trozas (Loetsch et al. 1964, Sorrentino 1994, 1997).

Sorrentino (1994) se describe dos procedimientos alternativos para considerar porcentaje de corteza. El primero consiste en realizar mediciones lineales de diámetros o circunferencias, medir espesores de corteza con alguno de los instrumentos específicos y descontar la corteza de las mediciones anteriores. Se aconseja realizar dos medidas opuestas del espesor de corteza y descontar la suma de ambos del diámetro con corteza. El segundo procedimiento consiste en realizar todas las mediciones con corteza y descontar sobre el volumen bruto calculado, un porcentaje de corteza.

No siempre se dispone de los instrumentos adecuados para medir espesor de corteza; en estos casos, los descuentos en el volumen de los árboles, pueden realizarse mediante el uso de porcentajes de corteza característicos de la especie en estudio.

## **D. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN EN POBLACIONES FORESTALES**

### **1. Unidades muestrales**

Prodan et al. (1997), Sorrentino (1997) coinciden en que la descripción de volumen en pie de existencias en crecimiento en poblaciones forestales, en general muy extensas y de difícil acceso, se basa en la medición de una pequeña muestra de árboles, seleccionados de modo que representen a toda la población. Por razones de eficiencia operativa, los árboles no se seleccionan individualmente, sino en grupos, llamados unidades muestrales o parcelas. El conjunto de las unidades de muestreo determina el tamaño de la muestra.

Loetsch y Haller (1964) señalan que las poblaciones forestales pueden dividirse, a los efectos de inventario, en unidades de igual superficie, cuando se trata de estudiar información relativa a una superficie de terreno. En otros casos, si la información de interés se vincula a árboles individuales, la población se considera formada por individuos como unidades muestrales.

Sorrentino (1997) agrega que a pesar de que una muestra no define exactamente a una población original, permite hacer inferencias estadísticas sobre ella. En este sentido, Fisher, citado por Loetsch y Haller (1964) define tres condiciones que debe cumplir un estimador satisfactorio de un parámetro poblacional: consistencia, eficiencia y suficiencia.

Un estadígrafo consistente es aquel que tiende a un valor fijo, equivalente al parámetro poblacional al aumentar el tamaño de la muestra. Es insesgado si se encuentra libre de errores de observación, mensura o cálculo. Un estadígrafo eficiente es aquel con menor varianza; la distribución del error tiende a ser normal con el aumento del tamaño de la muestra. Un estadígrafo suficiente suministra toda la información obtenible, que no puede ser mejorada por estimaciones adicionales.

Sorrentino (1997) recomienda en la práctica, realizar en la muestra una estratificación en base al atributo que interesa evaluar. Para Loetsch y Haller (1964) la estratificación consiste en dividir la población en sub-poblaciones más homogéneas a los efectos de reducir la varianza

Los parámetros más importantes que describen cada unidad muestral y con esto a la población en su conjunto, son el promedio, la varianza y el intervalo de confianza.

**Promedio :**  $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i / n$

donde:  $\bar{Y}$  = volumen promedio de existencias en pie del rodal expresado en metros cúbicos por hectárea

$Y_i$  = volumen por parcela expresado en metros cúbicos por hectárea

$n$  = número total de parcelas en la muestra

**Varianza :**  $S_y^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 / (n - 1)$

donde:  $S_y^2$  = varianza de la muestra

$Y_i$  = volumen por parcela expresado en metros cúbicos por hectárea

$n$  = número total de parcelas en la muestra

**Intervalo de confianza:**  $\bar{Y} \pm t (n - 1, 1 - \alpha/2) * S_y / \sqrt{n}$

donde:  $\bar{Y}$  = volumen promedio de existencias en pie del rodal expresado en metros cúbicos por hectárea

$t$  = valor t de tabla con  $1 - \alpha/2$  de probabilidad y  $n-1$  grados de libertad

$S_y$  = desvío estándar

$n$  = número total de parcelas en la muestra

#### a. Tamaño de muestra

El tamaño de muestra depende fundamentalmente de la calidad requerida del trabajo (error máximo admisible), del presupuesto asignado y de las características de las poblaciones forestales, como ser densidad de individuos al momento de la evaluación, homogeneidad en diámetros a la altura del pecho y volúmenes individuales; por ejemplo, la variabilidad en plantaciones artificiales puras y coetáneas es menor que en bosques nativos (Prodan et al. 1997, Sorrentino 1997).

Este tamaño de muestra se obtiene despejando  $n$  de la fórmula del error muestral:

$$E = \sqrt{(t \times CV) / n}$$

Despejando  $n$ , la fórmula es la que se detalla a continuación:

$$n = (t^2 \times CV^2) / E^2$$

donde:  $n$  = número de unidades de muestreo a medir  
 $t$  = variable tabular de Student (coeficiente de seguridad o confianza)  
 $CV$  = coeficiente de variación  
 $E$  = error de muestreo admisible

La fórmula del tamaño de muestra es una igualdad, siempre que el  $t$  empleado corresponda a los grados de libertad del  $n$  resultante. Si no fuera así, se debe reiterar el cálculo de  $n$  modificando el valor de  $t$ , las veces que sea necesario, hasta lograr la igualdad (Prodan et al., 1997).

#### **b. Forma y tamaño de las parcelas**

A continuación se hace referencia a tamaño y forma de las unidades de muestreo y las ventajas y desventajas asociadas a éstas, así como algunos procedimientos utilizados en su marcación en terreno.

La elección del tamaño de parcela reviste suma importancia dado que del mismo depende el grado de representatividad de la muestra respecto del parámetro poblacional que deseamos estimar (Cabrelli, 1993). Parcelas demasiado pequeñas atentan contra la validez del resultado y parcelas demasiado grandes dificultan la operatividad de la medición e impiden una eficiente distribución de las muestras.

Cabrelli (1993) recomienda que las unidades muestrales tengan un tamaño tal que contengan, en promedio, diez individuos. Torres et al. (2001) recomiendan usar un solo tamaño de parcela para toda la plantación, que permita medir entre 10 y 20 árboles. Sorrentino (1997) sostiene como criterio general que cada unidad muestral incluya entre 20 y 30 árboles, aunque en ciertos casos se podría admitir un número menor, entre 10 y 20 árboles.

Se ha señalado (Husch 1963, Cabrelli 1993, Sorrentino 1997) que en plantaciones ordenadas es común utilizar parcelas cuadradas o rectangulares, puesto que resulta fácil su replanteo en el terreno. Las parcelas cuadradas tienen una relación superficie/ perímetro intermedia entre las parcelas circulares y las rectangulares; admiten además grandes superficies (Prodan et al., 1997).

Para Sorrentino (1997) las ventajas de las parcelas rectangulares son la posibilidad de unidades muestrales de gran tamaño y su utilidad en bosques heterogéneos y variables, con accidentes topográficos frecuentes, pues cubren toda la fuente de variación. Entre las desventajas se encuentra la menor relación superficie/ perímetro, que implica una máxima proporción de árboles de borde.

Sorrentino (1997) expresa que las principales ventajas de las parcelas circulares se relacionan con su máxima relación superficie/ perímetro, con un menor número de situaciones dudosas en cuanto a árboles de borde y con su cualidad de isotrópicas, *i.e.* cuyas propiedades no dependen de la dirección. Una ventaja adicional de las parcelas circulares es que son definidas por una única dimensión, el radio (Husch 1963, Sorrentino 1997). Entre las desventajas de las unidades muestrales circulares se mencionan las dificultades en la demarcación, debido a sus límites curvos, la necesidad de verificar reiteradamente la situación de los árboles límite y las limitantes en su tamaño, dado que al aumentar el radio el número de árboles límite aumenta (Husch 1963, Loestch et al. 1964, Sorrentino 1997).

En plantaciones de pinos manejados, Sorrentino (1997) sugiere parcelas cuadradas de 400 m<sup>2</sup>, parcelas rectangulares de 500 m<sup>2</sup> o bien parcelas circulares de 200 a 400 m<sup>2</sup>.

Los procedimientos para delimitar parcelas cuadradas y rectangulares en terreno son variados. Sorrentino (1997) menciona un método conocido como 3-4-5, consistente en utilizar una cuerda marcada en longitudes de 3, 4 y 5 unidades para trazar dos líneas perpendiculares a partir de un vértice. Prodan et al. (1997) proponen el uso de un cuadrante de material estable y resistente, con las diagonales marcadas, que permite prolongar las diagonales desde el centro hasta lograr el tamaño de parcela deseado. Las parcelas cuadradas son preferibles a parcelas circulares de tamaño comparable cuando para delimitar estas últimas es necesario confirmar la posición de más de cuatro árboles a los efectos de su demarcación.

## **E. MÉTODOS DE MUESTREO UTILIZADOS**

### **1. Muestreo Bitterlich**

#### **a. Principios del método**

Si bien este método de muestreo ha recibido más de 20 nombres diferentes en la literatura, su creador prefiere el término original “angle-count sampling” (en inglés, muestreo por conteo de ángulos), porque enfatiza lo esencial del método, que consiste en una técnica estadística que permite estimar áreas basales con solo contar el número de árboles cuyo diámetro a la altura del pecho iguala o exceden un ángulo de visión horizontal  $\alpha$  (Bonilla 1969, Bitterlich 1984, Sorrentino 1997). El área basal se mide directamente en metros cuadrados por hectárea, con el observador situado en un punto fijo de la plantación y comparando el diámetro de referencia de cada árbol con el ángulo  $\alpha$  y contando como 0.5 aquellos que igualan y como 1 los que superan dicho valor, según la fórmula

$$G = z * k$$

donde **G** es el área basal en metros cuadrados por hectárea en un punto de la plantación;

**z** es el número de árboles contados y

**k** es el factor de área basal.

Respecto a la densidad de puntos de muestreo, Bitterlich (1984) sostiene que la misma depende de la condición del área a muestrear, de factores económicos y por último, pero no menos importante del factor de área basal a utilizar. Sorrentino (1997), presenta una tabla en la cual se da el número de puntos de muestreo o estaciones de lectura por hectárea y distancias adecuadas entre centros en metros, propuestos por Bitterlich (1984) para diferentes superficies de plantación en hectáreas con factores de área basal 1,2 y 4.

El muestreo Bitterlich ha sido descrito como un caso particular de muestreo con probabilidad proporcional al tamaño. Se ha denominado también muestreo puntual, muestreo sin parcelas o parcelas de radio variable. En este método cada individuo tiene una probabilidad proporcional a su tamaño, definido por su diámetro a la altura del pecho y correspondiente área basal, de ser incluido en la unidad de muestreo (Bonilla 1969, Prodan et al. 1997, Sorrentino 1997). Los autores también coinciden en que la calidad en la estimación del área basal por muestreo Bitterlich se ve afectada por diversos factores como especie, edad, densidad, presencia de sotobosque, factor de área basal utilizado, etc. Por esto, no se pueden dar recomendaciones generales respecto al método.

Los factores que más condicionan la eficiencia del muestreo Bitterlich son densidad, variabilidad y distribución espacial de los árboles en el rodal, pues determinan la cuenta media por punto y su variación.

Bonilla (1969) señala además que este método permite trabajar con parcelas que tienen un número igual o similar de árboles, sin tener en cuenta el tamaño de éstos, cosa que no sucede con las parcelas de tamaño determinado, en las que el número de árboles está en relación directa con el tamaño de éstos.

Bitterlich (1984) considera que el punto de muestreo debe ser localizado objetivamente, sin influencia personal del operario.

#### **b. Elección del factor de área basal (FAB)**

Según Bitterlich (1984) en la elección del FAB se debe considerar de qué manera el radio promedio de la parcela afecta la visibilidad de los árboles y el número aproximado de árboles a contar en cada punto de muestreo. Estos factores se vinculan a características de la plantación como homogeneidad y densidad y al tamaño de los árboles en cuestión.

Se destaca la importancia del grado de homogeneidad del rodal en la elección del FAB (Bitterlich, 1984), especialmente en muestreos sistemáticos, puesto que de ésta dependen las posibilidades de extrapolar información a las áreas cercanas ó intermedias entre puntos de muestreo.

En términos generales, una población homogénea y/o muy densa necesita un FAB mayor; por otra parte, en un rodal heterogéneo y/o poco denso es conveniente utilizar parcelas más grandes adoptando un FAB menor. Se recomienda utilizar  $FAB = 1$  para rodales con área basal menor a  $20 \text{ m}^2/\text{ha}$ ;  $FAB = 2$  para poblaciones con área basal entre  $20$  y  $40 \text{ m}^2/\text{ha}$  y  $FAB = 4$  en rodales de más de  $40 \text{ m}^2/\text{ha}$  (Sorrentino, 1997).

Bitterlich (1984) recomienda que en rodales heterogéneos se realicen varios giros en el área de muestreo para elegir un FAB adecuado, ó aún más simple, cotejar diferentes valores de FAB, desde los mayores a los menores, hasta que el número de árboles contados se encuentre entre siete y diez.

En cuanto al número aproximado de árboles a contar en cada punto de muestreo, Bitterlich (1984) aconseja, en base a consideraciones estadísticas, elegir un FAB tal que se cuenten entre siete y catorce individuos. No obstante, se hace referencia (ibid.) a autores que recomiendan entre tres y ocho árboles, mientras que otros sostienen que se deberían contar al menos diez árboles en cada punto de muestreo. A su vez, Prodan et al.(1997) citan autores que sugieren que las parcelas Bitterlich deberían incluir entre 5 y 15 árboles; en caso de dudas, aconsejan optar por el FAB que asegure cuentas pequeñas, aún entre 6 y 8 árboles. Sorrentino (1997) recomienda un FAB que permita contar entre diez y veinte árboles en cada giro, puesto que menos de diez sería insuficiente y más de veinte aumentaría los riesgos de errores porque parte de los árboles se encuentra a gran distancia de operador. Algunos autores citados por Bonilla (1969) sugieren usar un FAB que permita contar entre 5 y 10, ó aún entre 4 y 8 árboles por punto de giro, en tanto que otros recomiendan que la parcela Bitterlich incluya al menos 20 árboles.

Trabajando en un bosque de pino adulto, Bonilla (1969) encontró que el muestreo Bitterlich sobrestima los valores respecto a métodos convencionales. La magnitud de esta diferencia variaba según el FAB utilizado; resultaba mayor con los factores 2 y 4 en comparación con el FAB 1. El autor sostiene que, en teoría, cuanto menor es el FAB, mayor será la exactitud lograda en la medición del área basal en el muestreo, puesto que se cuenta un mayor número de árboles en cada punto.

### **c. Ventajas del muestreo Bitterlich**

El muestreo Bitterlich es útil en determinaciones rápidas de área basal y volumen cuando no es necesaria una gran exactitud. Este método resulta más eficiente en plantaciones fustales más o menos ordenadas, limpias, sobre terrenos planos, siendo muy adecuado para actualizaciones periódicas de información. Permite además, obviar los errores que derivan de una estimación insegura de la superficie de la parcela o las dificultades en la marcación de ángulos y distancias de parcelas convencionales (Bonilla 1969, Sorrentino 1997).

Bitterlich (1984) destaca que el muestreo con parcelas de radio variable es más eficiente que el uso de parcelas circulares de radio fijo puesto que se obtiene la misma precisión con un menor número de árboles por unidad muestral. Si se elige un FAB adecuado, se puede estimar el área basal a partir de un número reducido de individuos, lo que se traduce en menores tiempos y costos de medición, con la posibilidad de aumentar el número de parcelas y mejorar la distribución de las mismas. Además del relascopio, se puede medir área basal con placa Bitterlich o con otro instrumento de bajo costo y fácil manejo (Bonilla, 1969).

#### **d. Desventajas del muestreo Bitterlich**

Algunos inconvenientes de este método de muestreo se relacionan con errores operativos que surgen de subestimar o sobrestimar los valores a determinar (Bonilla 1969, Nyysönen 1976, Sorrentino 1997). La probabilidad de cometer errores operativos aumenta en las situaciones que se enumeran a continuación.

1. Rodales con alta densidad de población.
2. Uso de valores de FAB menores.
3. En tallares, en fustales de regeneración natural densa o en sitios con fuertes pendientes, el trabajo se dificulta y se enlentece, ya sea por interferencia visual de los tallos del rodal o del sotobosque o porque la luz bajo el dosel es insuficiente.
4. Cuando el operador no tiene un cabal conocimiento del principio en que se basa el muestreo, puede incurrirse en errores sistemáticos debido a la facilidad de procedimiento.

Por último, Bonilla (1969) señala que el muestreo Bitterlich sólo permite determinar área basal total por hectárea, sin discriminar por clase diamétrica.

## **2. Muestreo Aleatorio Simple (MAS)**

### **a. Principio del método**

En el MAS la selección de unidades de muestreo está controlada por el azar y cumple la condición de que todas las unidades posibles deben tener una probabilidad uniforme de ser seleccionadas. En tal caso, se pueden realizar estimaciones insesgadas y suficientes de valores totales y promedio poblacionales y de sus respectivos errores de muestreo (Loetsch y Haller 1964, Prodan et al. 1997, Sorrentino 1997, Torres y Magaña 2001).

Torres y Magaña (2001) señalan que el MAS requiere conocer el número total de parcelas de muestreo posibles dentro de la población, por lo que se debe contar con una estimación precisa de la superficie de plantación y un croquis o plano detallado de la misma. Además, si los puntos seleccionados en la planificación son fácilmente accesibles, se facilita su búsqueda. Los autores sostienen que para calcular el tamaño mínimo de muestra es necesario identificar una variable de interés, que define las características del muestreo.

Se recomienda que la superficie de cada unidad muestral sea equivalente a la superficie de un rectángulo o cuadrado definido por una cuadrícula a escala adecuada superpuesta al croquis o plano del rodal (Sorrentino 1997, Torres y Magaña 2001). Por lo tanto, en el MAS las unidades muestrales son de tamaño constante (Prodan et al., 1997).

#### **b. Ventajas del MAS**

Si bien no existen restricciones estadísticas para la aplicación del MAS (Sorrentino, 1997), su utilización en muestreo de poblaciones forestales se hace más común en circunstancias similares a las que se describen a continuación.

- i. El MAS es aplicable a poblaciones homogéneas, en las que no existe diferencias marcadas en estratos.
- ii. También es adecuado a poblaciones pequeñas o rodales resultantes de subdividir una población de mayor tamaño en sub-poblaciones o estratos.
- iii. Puede ser adoptado ventajosamente para inventarios forestales de reconocimiento en grandes extensiones, con el fin de planificar trabajos posteriores más detallados.
- iv. El MAS se adapta a muestreos preliminares realizados para diseñar y planificar cualquier tipo de muestreo, incluido el propio muestreo aleatorio simple.

Prodan et al. (1997) consideran que el MAS es probablemente la estrategia más ineficiente de muestreo, pero presenta la ventaja de que las estimaciones del total y promedio poblacional y sus errores serán insesgadas.

#### **c. Desventajas del MAS**

En poblaciones forestales muy variables y heterogéneas, el MAS presenta una desventaja estadística por sus características de diseño. Existe la posibilidad de que las unidades muestrales se concentren por azar en ciertos sectores del rodal, lo que hace que la muestra no sea representativa de la población. Este inconveniente se podría obviar si se aumenta el tamaño de la muestra, lo que supone mayor tiempo y costo del inventario. En este sentido, se señala que para que un método de muestreo resulte eficiente, debe proporcionar la misma precisión que otros diseños, con menor tiempo de ejecución y a un menor costo (Sorrentino, 1997).

En general, debido a las dificultades prácticas del diseño de muestreo, el MAS se usa toda vez que no existe la alternativa de un muestreo sistemático. Con respecto a la desventaja operativa de este método, la autora sostiene que la parte más difícil del diseño consiste en replantar en terreno las unidades seleccionadas, inconveniente que es mayor en terrenos con pendiente (Sorrentino, 1997).

### **3. Muestreo Sistemático (MS)**

#### **a. Principio del método**

El muestreo sistemático (MS), que consiste en la distribución de las parcelas según un diagrama prefijado, se conoce también como sistema de selección mecánica. En el MS la aleatoriedad es posible sólo en virtud de la elección al azar del lugar en que se inicia el muestreo. En este método se procura que la ordenación de las unidades de muestreo sea uniforme sobre la superficie del rodal (Cabrelli 1993, Sorrentino 1997, Prodan et al. 1997).

Para que el muestreo sistemático sea representativo, la muestra debe distribuirse sobre todas las condiciones ambientales (Prodan et al. 1997, Sorrentino 1997), aunque los riesgos de sesgar estimaciones se reducen hasta hacerse mínimos en muestreos muy intensivos o muy extensos.

Torres y Magaña (2001) recomiendan el muestreo sistemático con una intensidad entre 0.01 y 5 por ciento de la superficie plantada, dependiendo del tamaño de la plantación, la precisión requerida y la homogeneidad. También resaltan la importancia de la calidad de la estratificación de la plantación en función de alternativas de manejo, condiciones de crecimiento y edades.

La intensidad de muestreo (Cabrelli, 1993) depende de la superficie total de la plantación, de la variabilidad, de la exactitud necesaria, del valor de la plantación, de la accesibilidad y del nivel de significación de la variable  $t$ .

El mismo autor sostiene que la superficie efectiva del rodal mantiene una relación inversa con la intensidad. La intensidad debe ser mayor en la medida que sean mayores la variabilidad, la exactitud requerida y el valor de la plantación. En la medida que el acceso a la plantación sea más fácil, la intensidad de muestreo es mayor. A menor nivel de significación de la variable  $t$ , mayor intensidad.

## **b. Ventajas del MS**

Prodan et al. (1997) señalan las ventajas del MS que se enumeran a continuación.

1. En la mayoría de los casos se logra una representación más uniforme de la población, suministrando la cantidad máxima de información por unidad de superficie (Nyysönen , citado por Prodan et al., 1997).
2. Aún cuando se carezca de una representación cartográfica del bosque, es posible distribuir las unidades muestrales en el terreno. La localización de las unidades es generalmente más eficiente.
3. Con frecuencia resulta más eficiente que el muestreo aleatorio simple, ya que se obtiene un menor error de estimación para un mismo tamaño muestral.

## **c. Desventajas del MS**

Para Prodan et al. (1997) el MS implica un riesgo de obtener estimaciones sesgadas, que debe evaluarse en cada ocasión. Es posible que la red sistemática de unidades muestrales coincida con algún ordenamiento, también sistemático, de componentes del ambiente (topografía, suelo, etc.), arrojando resultados que no representan adecuadamente la realidad.

La dificultad en la aplicación de muestreo sistemático se relaciona con la estimación de los límites de confianza de los resultados (Nyysönen, citado por Prodan et al., 1997). Los métodos matemáticos en la derivación del error típico en muestreo aleatorio no son generalmente aplicables a muestreo sistemático. Esto se debe a que las posiciones fijas de las unidades de muestreo pueden producir una variable dependiente de la distancia entre los valores de las parcelas.

## **F. ANTECEDENTES DE TIEMPO**

En los inventarios es siempre necesario considerar la razón entre el tiempo empleado para las mediciones propiamente dichas y el tiempo de desplazamiento (Nyysönen, citado por Prodan et al., 1997).

Resultados de un trabajo realizado por Bonilla (1969) en un rodal de *Pinus radiata* de 15 años de edad, no raleado o débilmente raleado, indican que el tiempo insumido en el relevamiento de cada parcela convencional de 400 m<sup>2</sup> fue de 24 minutos, mientras que con el relascopio de Bitterlich el tiempo fue de 5, 4 y 3 minutos, para los FAB 1, 2 y 4, respectivamente. En base a estos resultados el autor justifica el uso del método de Bitterlich, especialmente con factor 4, cuando no se requiera gran exactitud en las mediciones y el tiempo sea un factor limitante.

## **G. OPTIMIZACIÓN DE INVENTARIOS**

Se entiende por inventario óptimo aquél que permite estimar alguna dimensión poblacional con un mínimo error a un determinado costo (Prodan et al., 1997). Avery (1967) define el inventario más eficiente como aquél que produce la máxima precisión por el dinero gastado.

La “condición de óptimo” suele expresarse también como la de aquel inventario que permite estimar con un determinado error al costo mínimo. Resulta difícil, sin embargo, dimensionar el error total que afecta a un inventario y aún más difícil programar un inventario estableciendo una magnitud límite para ese error, pues las fuentes de error son numerosas y difíciles de dimensionar (Nyysönen, citado por Prodan et al., 1997).

Al comenzar a planificar el diseño de un inventario es indispensable tomar, como punto de partida, los objetivos del mismo. Se debe considerar cuáles cuestiones se intentan aclarar con el inventario. Aún cuando las metas estén dadas, el planificador del inventario debe considerar si son adecuadas y hacer sugerencias a fin de lograr un trabajo que sirva mejor a las necesidades (Nyysönen, citado por Prodan et al., 1997).

El problema de los fondos disponibles para un inventario es vital e influye en gran medida la selección del diseño. En caso de que el presupuesto del inventario ya esté decidido, se debe planificar las operaciones tomando en cuenta este aspecto. Cuando exista cierta flexibilidad respecto a la asignación de fondos, se debe estimar el costo de cada fase de trabajo necesaria y el monto total de los costos del inventario, como parte integrante de la planificación. En la planificación se debe prever la disponibilidad de dinero, no solamente para la operación de campo, sino también para fotografías aéreas, equipo, trabajos de control, procesamiento de datos y su análisis (Nyysönen, citado por Prodan et al., 1997).

La precisión en las estimaciones de los parámetros más importantes debe ser determinada antes del inventario. Esto influye en la selección del diseño. Los objetivos dados en cuanto a la precisión necesitan generalmente una consideración más minuciosa. Cuando se menciona por ejemplo que los resultados del inventario deberían estar dentro de un rango determinado por ciertos porcentajes, hace falta aclarar que en inventario, tales límites son válidos solamente con cierta probabilidad (Nyyssönen, 1976).

El autor menciona que cuando hablamos de la precisión de una estimación en general, debemos referirnos al error total y no sólo al del muestreo; necesitamos prestar atención al sesgo.

Por ejemplo, no hay razón para describir la precisión del inventario con error de muestreo de  $\pm 3\%$  si no se ha controlado la reducción del volumen aprovechable por defectos, que puede significar tal vez 20 - 30% del volumen de fuste (Nyyssönen, 1976).

Diseñar un inventario forestal consiste principalmente en desarrollar la más eficiente combinación de diversas técnicas para conseguir los objetivos de la operación. Se debe seleccionar los componentes metódicos paso a paso. En realidad, cada paso consta de componentes metódicos opcionales. Cada uno de ellos ha de ser seleccionado en función de aspectos como objetivos y requisitos del inventario, error estándar permisible, consideraciones costo – eficiencia, accesibilidad del terreno, disponibilidad de personal entrenado y el evitar el sesgo eventualmente previsto (Nyyssönen, 1976).

## **1. Análisis de errores en inventarios**

El error total de inventario está constituido por el error de mediciones y el error de muestreo (Loetsch et al. 1964, Alder 1980, Prodan et al. 1997, Sorrentino 1997). Dada la importancia de los errores en los resultados de un inventario, algunos de ellos merecen un estudio detallado.

Los errores aleatorios se originan en modelos estimadores que poseen un componente de error y en la imprecisión de las mediciones. Estos errores se reducen a medida que crece el tamaño de la muestra (Prodan et al., 1997).

Los sesgos, llamados también errores no muestrales, se originan en un alto número de fuentes y afectan, en alguna medida, a todos los inventarios (Prodan et al., 1997).

No es posible formular un modelo optimizador de inventarios que considere todas las fuentes de error. Es posible, sin embargo, definir criterios para invertir el presupuesto total de modo que cada peso gastado aporte a la reducción del error. Para ello es necesario individualizar y cuantificar las fuentes de error y desarrollar los procedimientos adecuados para minimizar su efecto (Prodan et al., 1997).

Como medida del error de un inventario se emplea usualmente el llamado error muestral, que corresponde a la máxima diferencia probable, para un nivel de confianza dado, entre el valor estimado y el valor poblacional real. El error muestral considera como única fuente de error la variabilidad observada entre las unidades muestrales. Su determinación varía según el diseño muestral empleado (Prodan et al., 1997).

La experiencia general sobre inventarios indica que la diferencia entre el volumen estimado y el volumen realmente cosechado es en algunos casos muy pequeña y en otros puede superar varias veces el error muestral. El proceso de optimizar un inventario consiste, pues, en minimizar los errores no muestrales y en maximizar la eficiencia muestral (Prodan et al., 1997).

#### **a. Errores no muestrales**

Para Prodan et al. (1997) las principales fuentes de error no muestrales en inventarios son las siguientes:

- Errores de diseño
- Errores operacionales
- Errores en la determinación de superficies
- Errores de procesamiento
- Errores originados en el modelo dendrométrico
- Errores en el ajuste de existencias en pie

Se hará énfasis en las primeras cuatro fuentes de error, por ser las de mayor relevancia.

#### **Errores de diseño**

Los errores de diseño son aquellos que producen sesgos en las estimaciones o en sus errores, debido a que no se respetan las normas de selección probabilísticas o de independencia entre unidades muestrales. Entre ellos, pueden mencionarse los siguientes:

- Distribución subjetiva de las unidades muestrales
- Aglomeración o concentración de las unidades muestrales, lo que resulta en una muestra no representativa o en un número muy limitado de unidades independientes. Este error se da principalmente en el MAS.
- Localización de las unidades en red sistemática no representativa, cuando se utiliza el MS.

Este último error es de particular importancia, pues es usual que las unidades se distribuyan sistemáticamente y se empleen los estimadores del muestreo aleatorio simple, asumiendo aleatoriedad en la distribución de las unidades muestrales en la población.

Frecuentemente, cuando se utiliza el MS, una alta proporción de las unidades muestrales de la red se ubican en una determinada condición ambiental (altitud, exposición, posición topográfica, etc.), cuya proporción respecto del área boscosa total es muy diferente. Los sistemas de información geográfica (SIG) permitirían detectar redes sistemáticas inconvenientes y diseñar redes más representativas.

### **Errores operacionales**

Estos se originan en operaciones defectuosas. Las principales fuentes de errores operacionales son la localización viciada de las unidades muestrales, aún cuando el diseño sea el adecuado, la delimitación imperfecta de las mismas y los errores de medición de árboles. Todos ellos se minimizan mediante la capacitación del personal operativo y mediante un adecuado control de las operaciones.

Es muy difícil que el personal de inventario opere correctamente si no ha tenido una capacitación bien programada. Las actividades de capacitación deben orientarse especialmente a los objetivos que se enumeran a continuación (Prodan et al., 1997).

- Describir los objetivos del inventario y las opciones técnicas elegidas para la ejecución del mismo.
- Describir las fuentes de error y el procedimiento operativo que permite evitarlo, de modo que el personal conozca las consecuencias de una operación bien o mal ejecutada.
- Desarrollar aptitudes para operar con diferentes diseños muestrales, lo que incluye diferentes formas de distribuir y localizar las parcelas, y diversas formas de operar en terreno.

Estos objetivos apuntan principalmente a evitar sesgos, es decir a aumentar la eficacia de los inventarios. Además de esto, la capacitación técnica permitirá aumentar la eficiencia en el inventario, procurando que las actividades, además de realizarse en la forma correcta, se hagan al menor costo posible.

El control de calidad es un elemento esencial para lograr estimaciones muestrales eficaces. Sus objetivos principales se enumeran a continuación (Prodan et al., 1997).

- Detectar los errores operacionales y efectuar las acciones necesarias para eliminarlos o minimizarlos.
- Determinar la magnitud de los errores aleatorios (precisión) y sistemáticos (sesgo) que afectan a un proceso de muestreo, de manera que se pueda cuantificar el error global probable, incluyendo error aleatorio, errores originados en el muestreo y los sesgos operacionales y de otro tipo.

### **Errores en la determinación de superficies**

Aún cuando las fuentes de error en la determinación de superficies son numerosas, normalmente se asume que ésta se determina sin error. Las principales causas de este tipo de error se enumeran a continuación (Prodan et al., 1997).

- *Proceso cartográfico defectuoso*. El proceso cartográfico puede concluir en superficies sesgadas, debido al efecto conjunto de los errores de delimitación de rodales, de transferencia, de base cartográfica y de escala de los planos impresos. Muchas de estas fuentes afectan incluso a las estimaciones de superficie generadas automáticamente mediante SIG.
- *Limite inadecuado de superficies excluidas*. Este error se origina cuando existe incompatibilidad entre el diseño muestral y el modelo cartográfico. Si el diseño muestral especifica que las unidades muestrales deben desplazarse o eliminarse cuando los claros en el rodal exceden una determinada magnitud, tales claros deben encontrarse descontados en la superficie neta del rodal.

### **Errores generados en el manejo y procesamiento de los datos**

Existen varias fuentes de error relacionadas con el manejo y procesamiento de datos en inventarios, las que se enumeran a continuación (Prodan et al., 1997).

- *Error de codificación y registro de datos*. Se originan al registrar los datos de terreno en formularios. Son difíciles de detectar y corregir, pues muchos valores erróneos registrados se encuentran dentro de los rangos lógicos y dimensionales, de manera que no son detectados en un proceso rutinario de validación. El sistema de registro y codificación debe diseñarse de modo que se minimice el riesgo de este tipo de defectos. Posiblemente el uso de

capturadores electrónicos de datos sea adecuado, pero aún no se conocen estudios serios en este sentido.

- *Errores de transferencia de datos.* Existen diversas técnicas para disminuir el riesgo de este tipo de errores, como el ejemplo de doble digitalización o formulario de lectura directa. El empleo de capturadores electrónicos de datos es, en este sentido, el medio más eficiente y eficaz para la transferencia de datos.
- *Errores de procesamiento.* Los sistemas de procesamiento de datos de inventarios son por lo general complejos, pues deben ofrecer muchas opciones de proceso para una gran variedad de diseños posibles. Por ese motivo, frecuentemente los sistemas generan errores de procesamiento, especialmente al operar opciones de uso no frecuente.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **A. MATERIALES**

##### **1. Características del rodal**

Se trata de una plantación coetánea de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* (F. Mueller) Kirkpatrick de 12 años de edad, con un área efectiva de 18.5 ha, utilizada en su totalidad a los efectos del presente trabajo. La misma se encuentra aproximadamente a 9 km al Norte del km 161 de la Ruta Nacional N° 9 en la zona de José Ignacio, 7ª sección judicial, departamento de Maldonado.

En la misma se observan árboles dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos, siendo el estado sanitario general del rodal muy bueno, característica de esta especie en esa zona del país.

El marco de plantación utilizado fue de 4 x 2 metros, lo que da una densidad de 1250 árboles por hectárea. La sobrevivencia es buena ya que aún hoy se encuentra una densidad promedio de 1071 árboles por hectárea, talvez explicada por una buena elección del sitio combinada con una buena tecnología de plantación y cuidados anteriores y posteriores a ésta.

##### **2. Características de sitio**

Según datos de CONEAT el monte en cuestión tiene como unidad dominante la 2.12 y como asociada la 2.21. El grupo 2.12 está compuesto por Brunosoles Subéutricos Háplicos y Típicos, de texturas arenoso franco y franco, algunas veces arenosos franco gravillosos, superficiales y moderadamente profundos; asociados a estos se encuentran Litosoles Subéutricos Melánicos, areno-franco-gravillosos y Brunosoles Subéutricos Lúvicos, francos u ocasionalmente arenoso-francos.

El grupo 2.21 presente solo en un pequeño porcentaje, está compuesto por Brunosoles Lúvicos, francos y Argisoles Subéutricos Melánicos Abrúpticos, francos, a veces moderadamente profundos.

La pendiente presente en el monte es suave a moderada. A pesar de la poca pendiente no existen en el rodal anegamientos temporarios ni permanentes debido al buen drenaje existente.

### **3. Instrumentos utilizados**

Se utilizó el Reliscopio de Bitterlich para la medición de altura comercial y total de los árboles en todos los métodos de muestreo así como para medir el área basal en el muestreo Bitterlich.

La medición de los diámetros a la altura del pecho se realizó con forcípula común de madera. Para las mediciones de diámetros de los árboles apeados en la determinación de los factores de forma se utilizó una regla común graduada hasta milímetros.

La cinta métrica fue utilizada para la delimitación de las parcelas, mediciones de largos totales de árboles apeados y para las distancias del operador al árbol al cual se le medía la altura.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa Excel, planilla electrónica de cálculo.

La ubicación y búsqueda de las parcelas así como la determinación del área y del perímetro del rodal se realizó con GPS.

Para la elaboración del mapa del rodal y el diseño de los muestreos se utilizó el programa de sistema información geográfica Arc View 3.2.



FIGURA 1. Croquis de Ubicación de la Plantación

## B. MÉTODOS

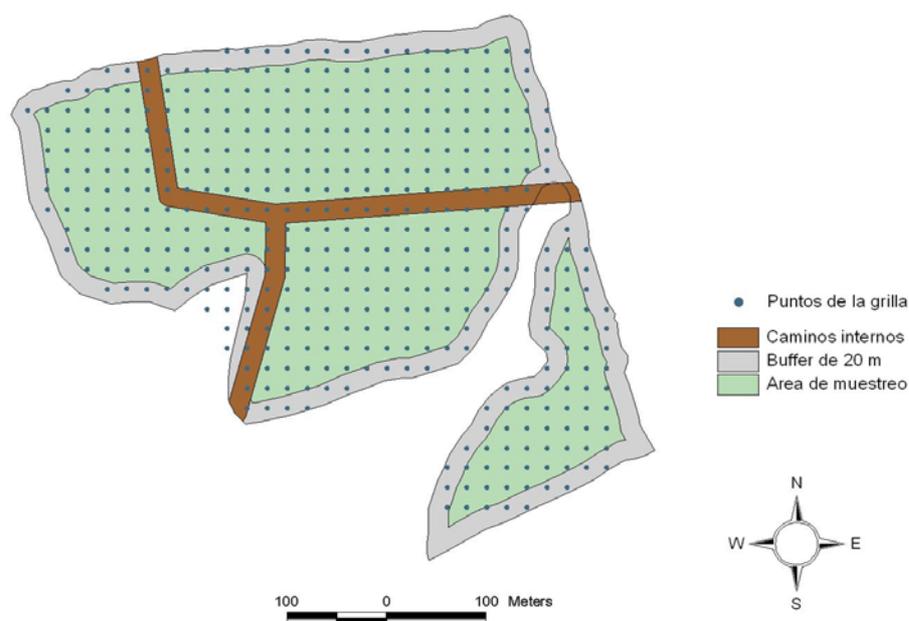
En primer lugar se hizo un recorrido del perímetro del rodal con GPS. Luego se marcaron algunos puntos con el GPS en los caminos internos para luego con ArcView unirlos y así delimitar los mismos. Después de haber realizado esta primera parte con el GPS se descargaron los datos del mismo a una computadora y se integraron en ArcView para su posterior manejo. En dicho programa se trazaron los caminos internos del rodal con el fin de descontar su área y así poder calcular el área efectiva de plantación. El área resultante fue de 18.5 hectáreas. Con este dato de área definimos el número de parcelas a muestrear en el muestreo Bitterlich ya que en el mismo se probaban tres intensidades de muestreo (un punto por hectárea, un punto cada dos hectáreas y un punto cada cuatro

hectáreas). Para hacer esto posible se buscó un número de parcelas divisible lo más cercano posible al valor real del área efectiva del rodal. El número que coincidió con dicho requisito fue de 20 parcelas.

Para los demás métodos de muestreo el número de parcela fue también de 20, para que pudieran ser comparables estadísticamente los resultados de los diferentes muestreos.

Después de realizados los muestreos se corroboró que el tamaño de muestra con un error máximo del 10% no superara el valor fijado de 20 parcelas. El tamaño de muestra para ese error según los cálculos fue de 15 parcelas para el muestreo aleatorio y 17 parcelas para el muestreo sistemático, por lo tanto por debajo del error estadístico prefijado.

Para hacer la distribución sistemática de las parcelas en el muestreo sistemático así como para las parcelas sorteadas en el muestreo aleatorio se construyó una grilla a escala considerando el tamaño de la parcela (20m \* 20m) con el programa GS Plus (Geostatistical Plus). Esa grilla en la cual cada punto representaba una parcela se superpuso con el mapa del rodal en ArcView y se procedió a construir la red sistemática de puntos para el muestreo sistemático luego de haber sorteado en forma aleatoria la primera parcela.



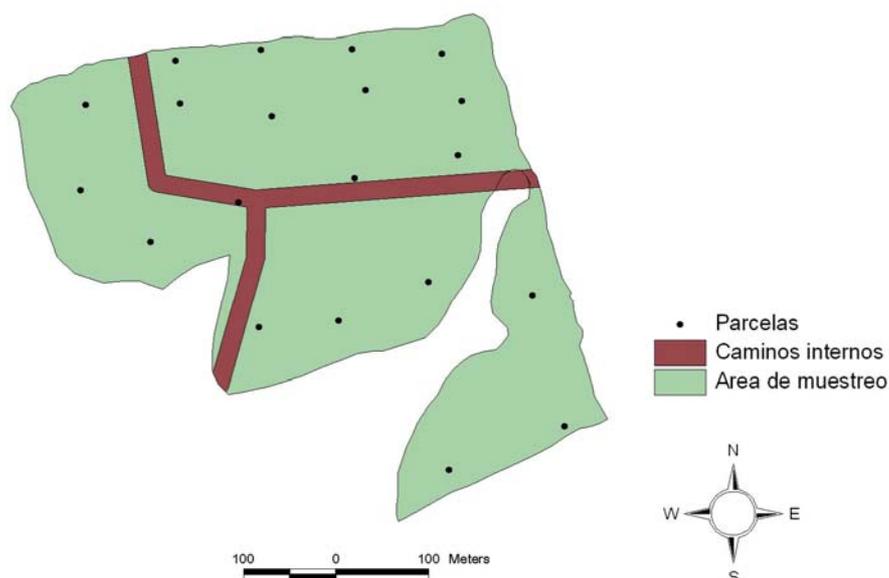
**FIGURA 2.** Grilla de puntos superpuesta sobre el mapa del rodal

Para el muestreo aleatorio se realizó un sorteo al azar de las parcelas con calculadora considerando los números identificatorios de cada punto de la grilla adjudicado por el programa. Se excluyeron todas las parcelas de borde para evitar sesgos en los cálculos. Esto se logró haciendo con Arc View una zona buffer de 20 m de ancho sobre todo el perímetro del rodal. Luego de tener todas las parcelas geográficamente identificadas para cada muestreo se cargaron al GPS y se buscaron en el rodal para su medición.

Los puntos cargados al GPS fueron solamente del muestreo aleatorio y del muestreo sistemático. Para el muestreo Bitterlich los puntos se distribuyeron y ubicaron en el propio rodal.

### 1. Metodología Bitterlich

Luego de tener el perímetro en el GPS y el área del rodal se procedió a la realización de los muestreos (giros) con el relascopio de Bitterlich, buscando que todo el rodal fuera muestreado en forma objetiva, y que cada una de las parcelas fuera ubicada en lugares representativos de la plantación abarcando toda la variabilidad existente. Para ayudar en dicha tarea se utilizó el GPS permitiendo distribuir mejor y con mayor seguridad los puntos en toda el área. Se utilizaron tres intensidades de muestreo, un giro por hectárea, un giro cada dos hectáreas y un giro cada cuatro hectáreas. La ubicación de las parcelas en el rodal se puede apreciar en el siguiente mapa.



**FIGURA 3.** Distribución de las parcelas en el muestreo Bitterlich

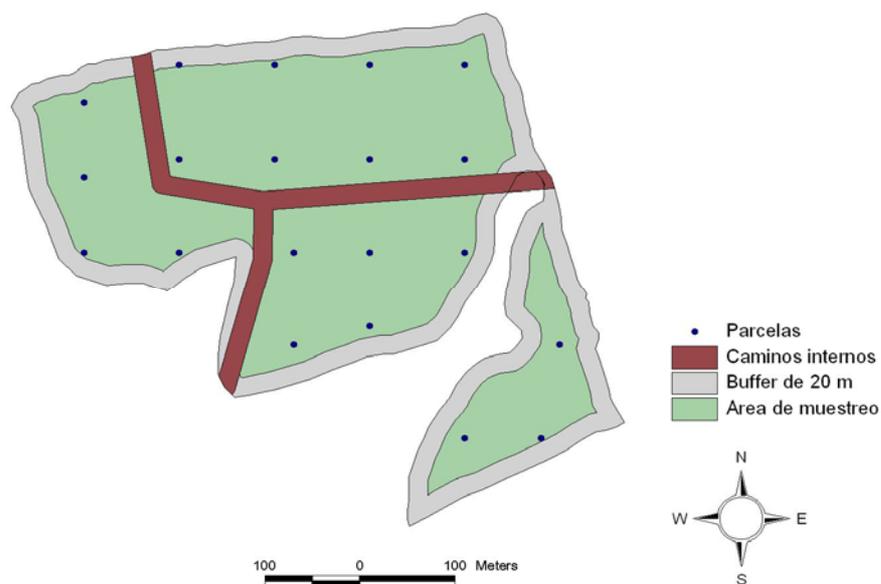
La determinación del área basal de cada parcela se realizó con factor de área basal dos, el cual permitió incluir un número satisfactorio pero no excesivo de árboles y una alta precisión de las mediciones.

Posteriormente se procedió a la elección del árbol representativo de la parcela para la determinación de altura total y comercial hasta 5 centímetros de diámetro. A dicho árbol se lo marcó y se le midió el *DAP* (diámetro a 1,30 metros del suelo). Las mediciones de alturas se realizaron también con el relascopio, utilizando en cada caso escalas semejantes a la altura del árbol a medir como forma de aumentar la confiabilidad de la medición.

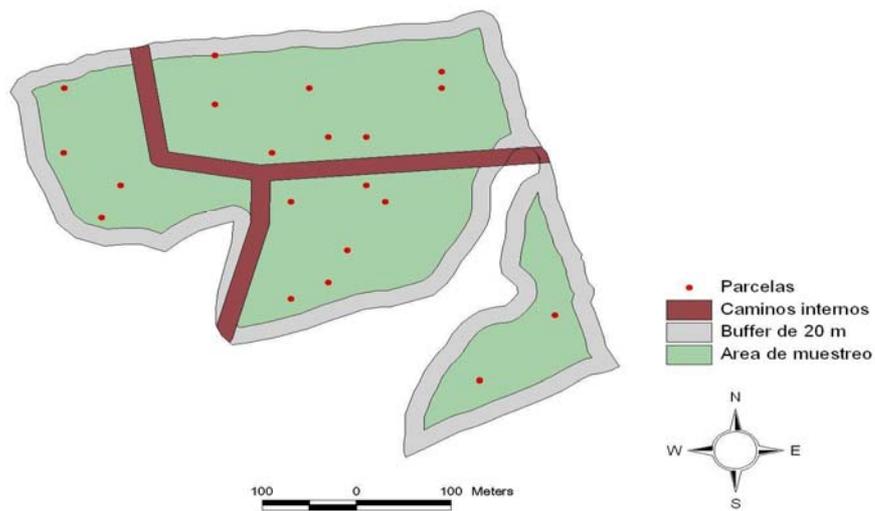
Con el objetivo de evitar errores sistemáticos, la elección de los puntos de muestreo, la realización del giro, la determinación de alturas así como la elección del árbol marca del giro, se realizó con la rotación de las funciones entre los operarios.

## 2. Muestreo Aleatorio y Sistemático

Ambos tipos de muestreos se describen en forma conjunta ya que para los dos se utilizó parcelas cuadradas de 400 metros, variando únicamente la ubicación de las mismas por las características de los muestreos. La distribución y ubicación de las parcelas para cada muestreo se aprecia en los siguientes mapas.



**FIGURA 4.** Distribución de las parcelas en el muestreo sistemático.



**FIGURA 5.** Distribución de las parcelas en el muestreo Aleatorio Simple.

Luego de la ubicación de las parcelas con el GPS se procedió a la marcación de las mismas mediante el método tres-cuatro-cinco, el cual permite obtener ángulos rectos de forma relativamente rápida y sin instrumentos sofisticados.

Antes de comenzar las mediciones se marcaron con cinta del mismo color los árboles más próximos a las esquinas de las parcelas como forma de delimitarlas. A continuación se procedió a la medición de los *DAP* de todos los árboles dentro de la parcela, mediante dos medidas perpendiculares con forcípula.

A los árboles marca de clase (uno por clase) se los marcó y se les midió altura total y comercial hasta cinco centímetros de diámetro, al igual que en el muestreo Bitterlich.

La elección de parcelas cuadradas se debió a que son fáciles de marcar en plantaciones sin curvas de nivel como en la plantación objeto de estudio, además de disminuir el problema de los árboles de borde.

Esta plantación en líneas hubiera permitido una fácil marcación de parcelas rectangulares, las que no se utilizaron por no existir variabilidad significativa debido a pendiente y por poseer mayor perímetro para igual área que las cuadradas.

La alta densidad de árboles por hectárea hubiera llevado a una alta cantidad de árboles de borde en parcelas circulares, además de no contarse con instrumentos que facilitaran la marcación de las mismas.

### **3. Determinación del factor de forma**

#### **a. Muestreo Aleatorio Simple y Muestreo Sistemático**

El factor de forma constituye una variable básica para el cálculo de volumen. Para la determinación del mismo se calculó el número mínimo de árboles a muestrear en cada clase diamétrica, usando como dato la variabilidad en el volumen aparente.

El procedimiento fue el siguiente. Se reunieron los datos de *DAP* con sus respectivas alturas de las parcelas de los muestreos sistemático y aleatorio y se calculó el volumen aparente. Después se determinó el coeficiente de variación de esos volúmenes para cada clase diamétrica y luego se calculó el tamaño de muestra. Se fijó un error máximo del 10% para el tamaño de muestra.

El número de árboles a medir para cada clase diamétrica se puede ver en el siguiente cuadro.

**CUADRO 1.** Numero de árboles a medir para el cálculo del factor de forma según clase diamétrica.

<b>Clase diamétrica</b>	<b>N° de árboles a medir</b>
Clase 1 (5-10cm)	<b>3</b>
Clase 2 (10-15cm)	<b>22</b>
Clase 3 (15-20cm)	<b>12</b>
Clase 4 (20-25cm)	<b>6</b>
Clase 5 (25-30cm)	<b>7</b>

Debido a razones prácticas y de aprovechamiento, el factor de forma se determinó al momento de la cosecha, no pudiéndose muestrear todo el rodal por razones de seguridad y practicidad. Dicha zona de muestreo fué representativa de la totalidad del rodal.

Antes de proceder al apeo y trozado de los árboles, se delimitó el área de trabajo y se marcaron los árboles con cinta de color visible, sobre la cual se anotó un número identificador y las correspondientes medidas perpendiculares de *DAP*. En esta etapa, se anotaron los números y diámetros en planillas elaboradas para tal fin (Anexo).

Tanto el apeo como el trozado fue llevado a cabo por personal especializado, realizándose este trozado cada 2.40 metros por cuestiones de aprovechamiento.

Las mediciones realizadas fueron las siguientes:

- Diámetros con y sin corteza en cada una de las caras de las trozas hasta la última troza comercial (dos medidas perpendiculares)
- Altura de tocón
- Largo total del árbol

Los factores de forma calculados fueron los siguientes:

FFcc - Factor de forma comercial usando altura comercial

FFct - Factor de forma comercial usando altura total

Fueron calculados según la siguientes fórmulas:

$FFcc = \text{Volumen real comercial sin corteza (Smalian)} / \text{Volumen aparente con corteza hasta altura comercial}$

$FFct = \text{Volumen real comercial sin corteza (Smalian)} / \text{Volumen aparente con corteza hasta altura total}$

El cálculo de estos dos factores de forma se hizo con la finalidad de usarlos en el cálculo de volumen en los tres métodos de muestreo involucrados y compararlos entre sí.

## **b. Muestreo Bitterlich**

Para el cálculo de volumen en el muestreo Bitterlich se utilizaron 5 factores de forma, que se enumeran a continuación

1. FF según el *DAP* del árbol promedio medido en cada punto, usando altura comercial
2. FF según el *DAP* del árbol promedio medido en cada punto, usando altura total
3. FF de la clase de *DAP* más frecuente, usando altura comercial
4. FF de la clase de *DAP* más frecuente, usando altura total
5. FF igual a 0.5

Para los primeros cuatro factores de forma enumerados los datos para el cálculo de los mismos se obtuvieron de los muestreos aleatorio y sistemático. El FF igual a 0.5 se utilizó para el cálculo de volumen por ser comúnmente usado en inventarios forestales comerciales cuando no se requiere gran precisión en la estimación de volumen y el tiempo es el factor determinante.

## **4. Toma de tiempos**

Con el fin de poder analizar el tiempo insumido por cada tipo de muestreo, se los dividió en una serie de etapas claramente definidas como se muestra a continuación.

Para el muestreo Bitterlich las etapas fueron:

- Búsqueda de parcela
- Giro (medición de AB)
- Elección del árbol medio, medición del *DAP* y de las alturas (comercial y total) del mismo

Para los muestreos aleatorio y sistemático las etapas fueron:

- Búsqueda de parcela
- Marcación de la parcela
- Medición de los *DAP* de todos los árboles de la parcela y medición de alturas (comercial y total) de los árboles marca de clase (uno por clase)

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### A. ANÁLISIS DE TIEMPO

Se dividió el tiempo que insumió cada muestreo en una serie de etapas claramente definidas, a los efectos de su análisis.

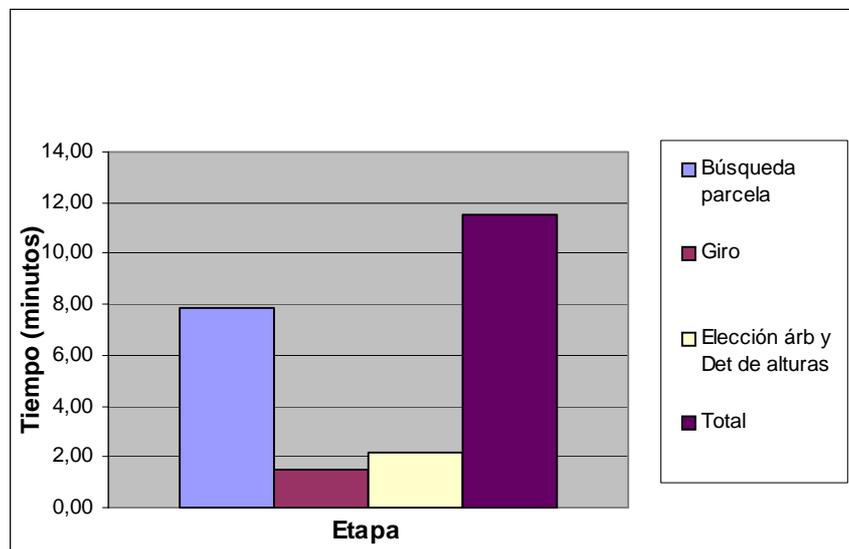
En el muestreo Bitterlich, se definió como etapas *a*) la búsqueda de la parcela, *b*) el giro y *c*) la elección del árbol medio, seguida de medición de *DAP*, altura comercial y altura total sobre este individuo.

En los muestreos aleatorio y sistemático las etapas fueron *a*) la búsqueda de la parcela, *b*) la marcación de la parcela y *c*) la medición de *DAP* sobre todos los árboles de la parcela, seguida de la medición de alturas total y comercial de un árbol marca de clase por clase diamétrica.

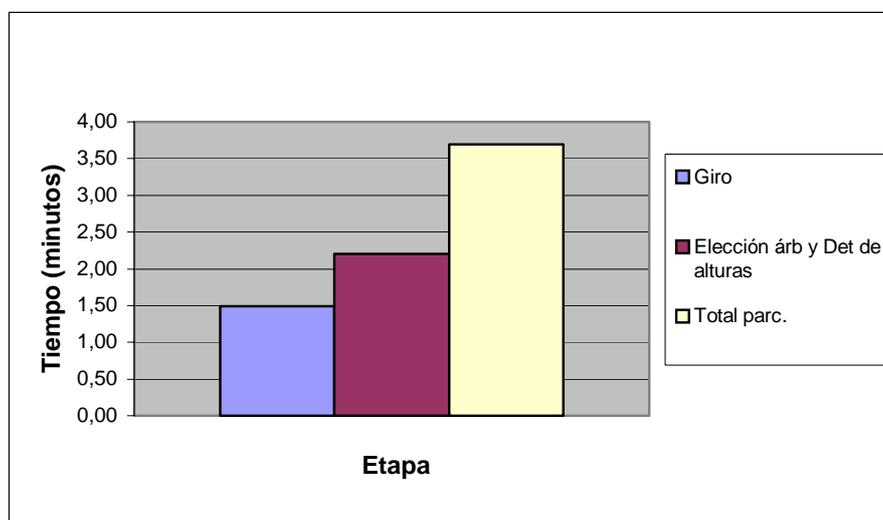
En el muestreo Bitterlich, se observó que la etapa que lleva más tiempo es la búsqueda de la parcela y la que insume menos tiempo es el giro, con tiempos promedio de 7.85 minutos y 1.49 minutos, respectivamente (Cuadro 2 y Gráfico 1). La elección del árbol medio y la medición de alturas tomó un tiempo promedio de 2.20 minutos. El tiempo total medio en cada punto de muestreo fue 3.69 minutos y el tiempo total promedio fue 11.54 minutos.

**CUADRO 2.** Tiempo promedio insumido por etapa en el muestreo Bitterlich

<b>Tiempo promedio (minutos)</b>				
Búsqueda parcela	Giro	Elección árbol y Medición de alturas	Total parcela	Total
<b>7,85</b>	<b>1,49</b>	<b>2,20</b>	<b>3,69</b>	<b>11,54</b>



**GRÁFICO 1.** Tiempo promedio insumido por etapa en Muestreo Bitterlich.



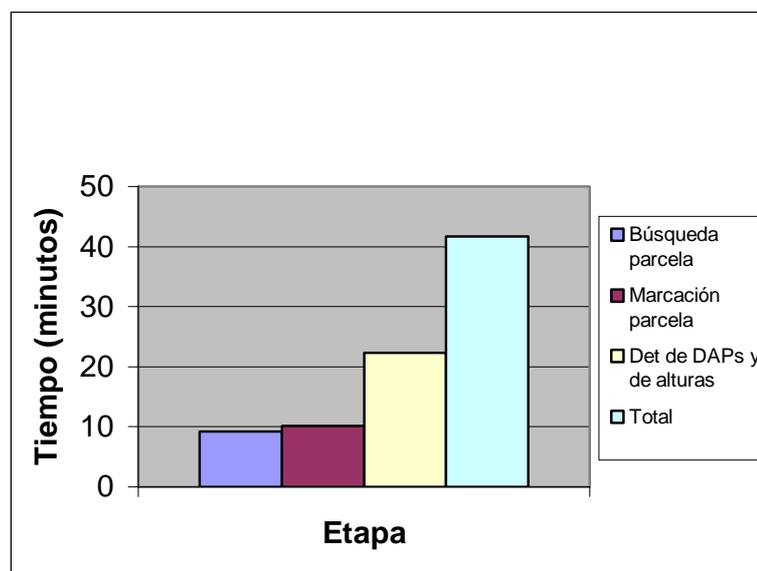
**GRÁFICO 2.** Tiempo promedio insumido por etapa dentro de cada parcela en el muestreo Bitterlich

En parcelas rectangulares de 400 m<sup>2</sup> el tiempo total fue de 41.73 minutos, incluyendo tiempo de búsqueda de la parcela, que en este caso fue de 9.28 minutos. La marcación de

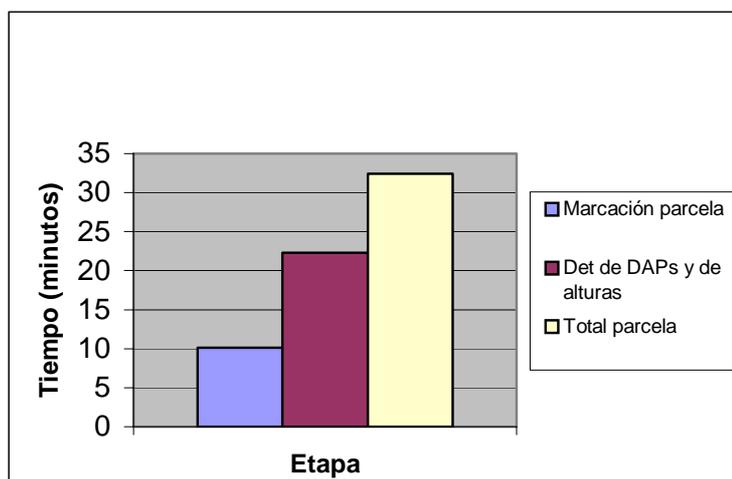
cada parcela insumió en promedio 10.15, mientras que la medición de los *DAP* de todos los árboles y la medición de alturas de los individuos marca de clase llevó 22.30 minutos. El tiempo total promedio para la parcela fue de 32.45 minutos.

**CUADRO 3.** Tiempo promedio insumido por etapa en el muestreo sistemático

<b>Tiempo promedio (minutos)</b>				
Búsqueda parcela	Marcación parcela	Medición de DAP y alturas	Total parcela	Total
<b>9,28</b>	<b>10,15</b>	<b>22,30</b>	<b>32,45</b>	<b>41,73</b>



**GRÁFICO 3.** Tiempo promedio y total insumido por etapa en el muestreo sistemático



**GRÁFICO 4.** Tiempo promedio insumido por etapa dentro de cada parcela en los muestreos sistemático y aleatorio.

En el muestreo aleatorio se tomaron sólo los tiempos de búsqueda de parcela, ya que el tamaño y la forma de las parcelas, así como los métodos de medición de *DAP* y alturas fueron iguales que en el muestreo sistemático. Por lo tanto, los tiempos promedio en el tiempo total de la parcela son los mismos en ambos muestreos. En el Cuadro 4 se muestran los diferentes tiempos asociados a cada método de muestreo.

**CUADRO 4.** Tiempo promedio y total de búsqueda y medición de la parcela según método de muestreo

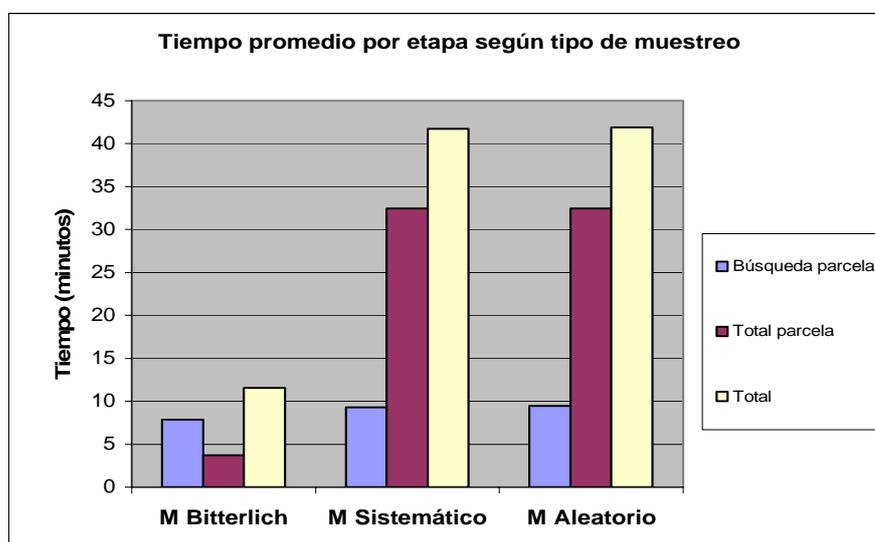
Tipo de muestreo	Búsqueda parcela (minutos)	Total parcela (minutos)	Total (minutos)
M Bitterlich	7,85	3,69	11,54
M Sistemático	9,28	32,45	41,73
M Aleatorio	9,44	32,45	41,89

En cuanto a la diferencias de tiempos entre los muestreos se puede observar que en el muestreo Bitterlich el tiempo promedio total de hacer una parcela es casi 9 veces menor que en los otros dos muestreos.

La búsqueda de parcela en el muestreo Bitterlich insume un tiempo promedio algo menor que en los demás métodos, pero según el análisis de varianza no existen diferencias significativas entre ellos.

Sobre el tiempo total la cual incluye el tiempo de búsqueda más el tiempo de hacer una parcela no existen diferencias entre los muestreos sistemático y aleatorio pero si entre estos y el muestreo Bitterlich, el que es 3.6 veces menor.

En el Gráfico 5 se comparan los tiempos vinculados a las etapas definidas en los tres métodos de muestreo.



**GRÁFICO 5.** Tiempo promedio por etapa y tiempo total según método de muestreo.

## **B. FACTOR DE FORMA**

### **1. Factor de forma comercial usando altura comercial**

Este factor de forma se calculó como el cociente del volumen real hasta la altura comercial sobre el volumen aparente hasta la misma altura.

$$FF = \text{Volumen real comercial} / \text{Volumen aparente comercial}$$

Para el cálculo del volumen real comercial la altura comercial fue corregida por múltiplo de troza de 2.40 m.. El volumen fue calculado según la fórmula de Smalian, que se describe a continuación:

Fórmula de Smalian:

$$V_s = \pi / 8 (d^2 + D^2) * L$$

Donde:  $V_s$  es el volumen real de la troza  
 $d$  es el diámetro menor de la troza  
 $D$  es el diámetro mayor de la troza  
 $L$  es el largo de troza

Fórmula acumulada de Smalian:

$$V_s = \pi / 8 [ D_o^2 + D_n^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} D_i^2 ] * L$$

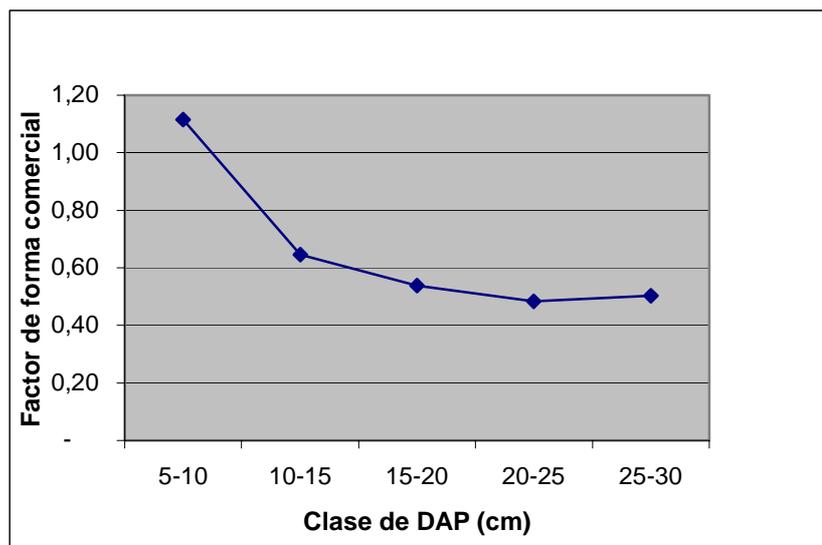
Donde:  $V_s$  es el volumen real total del fuste  
 $D_o$  es el diámetro en la base del fuste (primera troza comercial)  
 $D_n$  es el diámetro menor de la última troza comercial  
 $D_i$  es el diámetro de las caras de las trozas intermedias  
 $n$  es el número de trozas

**CUADRO 5.** Factor de forma comercial usando altura comercial según clase diamétrica.

Clase de DAP (cm)	Factor de forma comercial
5-10	1,11
10-15	0,65
15-20	0,54
20-25	0,48
25-30	0,50

Los datos obtenidos concuerdan con la bibliografía consultada. El factor de forma comercial usando altura comercial disminuye al aumentar el *DAP* de los árboles. En la clase diamétrica I (5 a 10 cm) el factor de forma mayor a 1 se debe a la forma neiloide de la base del fuste, que hace que el volumen real sea mayor que el volumen del cilindro calculado a partir del diámetro de referencia. Entre la clase I y la siguiente (10-15 cm) se

constató una reducción pronunciada del factor de forma con el aumento en el *DAP* (Cuadro 5). En las siguientes clases diamétricas (IV y V) los valores del factor de forma tienden a valores similares (Cuadro 5). Este comportamiento se puede atribuir a la alta densidad de rodal y a que la plantación no había recibido cortas intermedias como podas y raleos.



**GRÁFICO 6.** Relación entre el *DAP* y el factor de forma comercial usando altura comercial (FFcc)

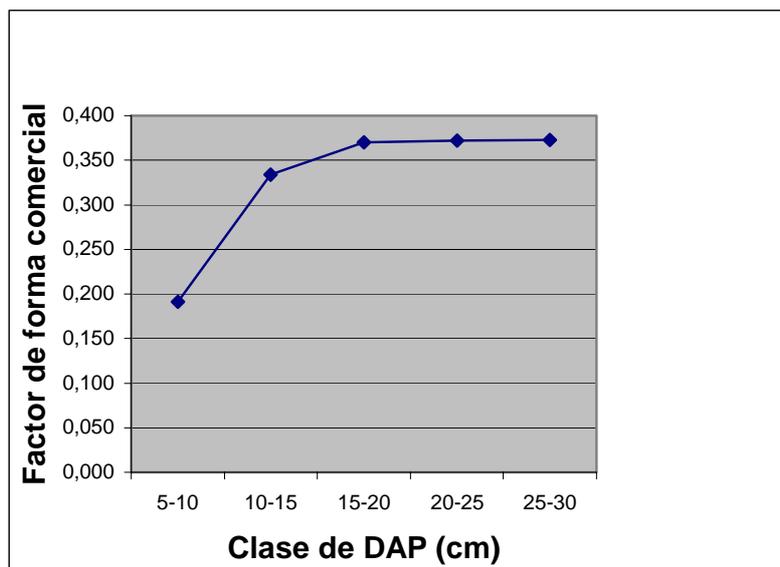
## 2. Factor de forma comercial usando altura total

Este factor de forma se calculó como el cociente del volumen real hasta la altura comercial sobre el volumen aparente hasta altura total.

$$FF = \text{Volumen real comercial} / \text{Volumen aparente total}$$

**CUADRO 6.** Factor de forma comercial usando altura total según clase diamétrica.

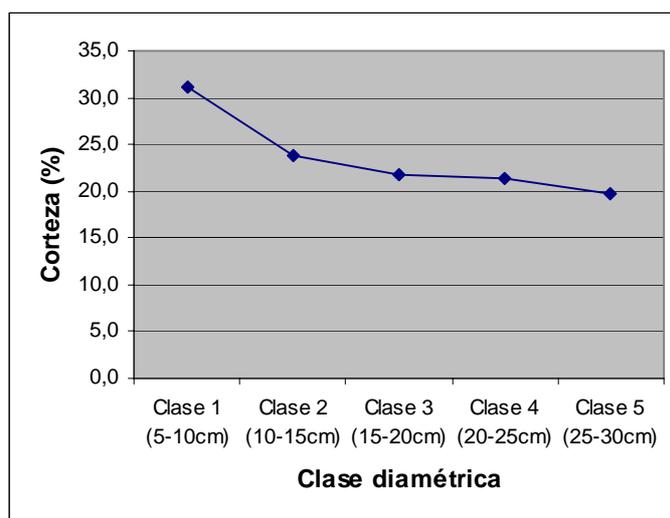
Clase de DAP (cm)	Factor de forma comercial
5-10	0,191
10-15	0,334
15-20	0,370
20-25	0,372
25-30	0,373



**GRÁFICO 7.** Relación entre el *DAP* y el factor de forma comercial calculado con altura total (*FFct*)

La relación entre factor de forma comercial calculado con altura total (*FFct*) y *DAP* es diferente a la observada para factor de forma con altura comercial (*FFcc*). El valor de *FFct* aumenta con el aumento en *DAP*, en especial entre la clase I (5 – 10 cm) y la clase II (10 – 15 cm); en las clases III a V, el *FFct* presenta tasas de incremento menores al aumentar los valores de *DAP*, con tendencia a un valor constante (Gráfico 7). Esta relación se debe a que en las clases diamétricas menores los árboles presentan bajo porcentaje de madera comercial y el porcentaje de copa es alto en relación a la altura total. A mayores valores de *DAP*, la proporción del volumen comercial en el volumen total del árbol

aumenta, en tanto que la proporción de copa en el volumen total del árbol y el porcentaje de corteza disminuyen (Gráfico 8).



**GRÁFICO 8.** Relación entre el *DAP* y porcentaje de corteza por clase diamétrica.

## C. COMPARACION DE MÉTODOS DE MUESTREO

### 1. Comparación entre todos los muestreos

La comparación entre los métodos de muestreo se realizó en tres etapas *viz.* *a)* se calcularon los intervalos de confianza de las medias de volúmenes comerciales estimados por cada método; *b)* se analizaron dichos intervalos de confianza y las medias para cotejar si el valor del volumen de cosecha obtenido se hallaba comprendido en el intervalo; *c)* se hicieron análisis de varianza para estudiar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los valores promedio de volumen estimados para los diferentes métodos con los factores de forma *FFcc* y *FFct*.

**CUADRO 7.** Tabla de existencias en pie del rodal usando factor de forma comercial de altura comercial (*FFcc*) según tipo de muestreo.

	Promedio	Intervalos de confianza (95%)	
		Limite inferior	Limite superior
Tipo de muestreo	Vol com tot (m3)	Vol com tot (m3)	Vol com tot (m3)
Sistemático	<b>5011</b>	4568	5454
Aleatorio simple	<b>4736</b>	4376	5096
Bitterlich *	<b>5142</b>	4659	5625

\*Nota: Muestreo Bitterlich calculado con *FFcc* del árbol medio medido en cada punto

Los intervalos de confianza en todos los métodos de muestreo incluyen el valor real de volumen de cosecha obtenido de 4730 m<sup>3</sup> (Cuadro 7).

Se realizó un análisis de varianza de estos valores promedio utilizando el software estadístico SAS. No se observó diferencias significativas ( $P = 0.05$ ) entre las medias de los tratamientos por la prueba de Tukey. (Cuadro8).

**CUADRO 8.** Comparación de volúmenes comerciales promedio estimados con *FFcc* para los tres métodos de muestreo.

Tukey	Media (m <sup>3</sup> / ha)	Método de muestreo
A	277.95	Bitterlich
A	270.87	Sistemático
A	256.00	Aleatorio

En el Cuadro 9 se muestran intervalos de confianza para valores de volumen estimados con los tres métodos de muestreo, utilizando factores de forma comerciales de altura total (*FFct*).

**CUADRO 9.** Tabla de existencias en pie del rodal usando factor de forma comercial de altura total (*FFct*) según tipo de muestreo.

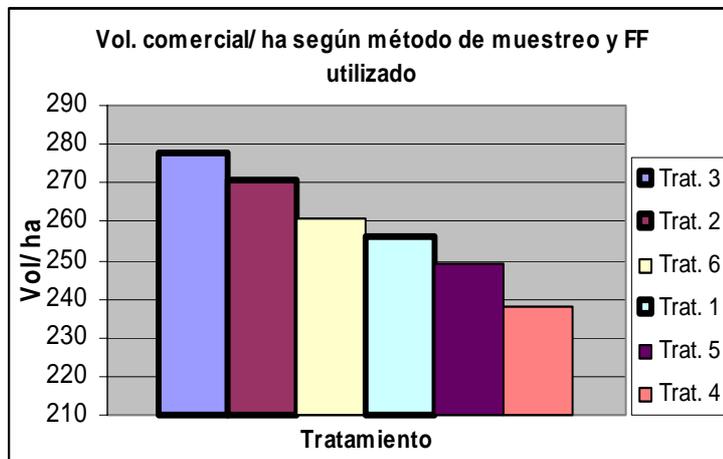
	Promedio	Intervalos de confianza (95%)	
		Limite inferior	Limite superior
Tipo de muestreo	Vol com tot (m3)	Vol com tot (m3)	Vol com tot (m3)
Sistemático	<b>4607</b>	4189	5026
Aleatorio simple	<b>4405</b>	4074	4736
Bitterlich	<b>4825</b>	4373	5277

\*Nota: Muestreo Bitterlich calculado con *FFct* del árbol medio medido en cada punto

Si se compara los resultados del Cuadro 9 con los del Cuadro 7 se puede apreciar que, dentro de cada muestreo, las medias obtenidas usando *FFct* son menores que cuando se usó *FFcc*; los intervalos de confianza son a su vez más estrechos. Pese a estas discrepancias, no existen diferencias estadísticamente significativas, tanto entre los valores de cada método de muestreo como entre los valores de diferentes métodos (Cuadro 10).

**CUADRO 10.** Comparación de volúmenes comerciales promedio estimados con *FFcc* y *FFct* para los tres métodos de muestreo.

Tukey	Media (m3/ha)	Método de muestreo
A	277.95	Bitterlich con <i>FFcc</i> (3)
A	270.87	Sistemático con <i>FFcc</i> (2)
A	260.83	Bitterlich con <i>FFct</i> (6)
A	256.00	Aleatorio con <i>FFcc</i> (1)
A	249.03	Sistemático con <i>FFct</i> (5)
A	238.13	Aleatorio con <i>FFct</i> (4)



**GRÁFICO 9.** Volumen comercial por hectárea según método de muestreo y factor de forma utilizado

## 2. Muestreo Bitterlich; estimación de volumen con diferentes factores de forma

En la estimación de volumen a partir del muestreo Bitterlich se probaron diferentes factores de forma. Se definieron cinco tratamientos de cálculo, a saber:

**Tratamiento 1** -  $FF_{cc}$  de la clase a la cual pertenece el árbol medio medido en cada punto de muestreo

**Tratamiento 2** -  $FF_{ct}$  de la clase a la cual pertenece el árbol medio medido en cada punto de muestreo

**Tratamiento 3** -  $FF = 0.5$  (usado solamente con alturas comerciales)

**Tratamiento 4** -  $FF_{cc}$  de la clase diamétrica más frecuente

**Tratamiento 5** -  $FF_{ct}$  de la clase diamétrica más frecuente

Los resultados de estos diferentes tratamientos para el muestreo Bitterlich se muestran en el Cuadro 11.

**CUADRO 11.** Tabla de existencias en pie del rodal según factor de forma utilizado en muestreo Bitterlich.

Tratamiento	Promedio	Intervalo de confianza (95%)	
		Limite inferior	Limite superior
	Volumen comercial total (m <sup>3</sup> )		
<b>1</b>	<b>5142</b>	4659	5625
<b>2</b>	<b>4825</b>	4373	5277
<b>3</b>	<b>5042</b>	4518	5565
<b>4</b>	<b>5421</b>	4857	5984
<b>5</b>	<b>4812</b>	4364	5260

Entre los diversos tratamientos de cálculo, el Tratamiento 4 es el único que genera un intervalo de confianza que no comprende el volumen real cosechado (4730 m<sup>3</sup>). Por lo tanto, si bien el análisis de varianza para los diferentes tratamientos no detecta diferencias significativas (Anexo), el Tratamiento 4 de todas formas quedaría excluido como método de estimación confiable.

El uso de cualquiera de los restantes tratamientos es válido. Se puede medir altura comercial y estimar luego volumen con un factor de forma comercial o simplemente medir alturas totales y restar la parte no comercial en el factor de forma.

El Tratamiento 3, que consiste en asignar al *FF* un valor 0.5 resultó un valor adecuado en el rodal bajo estudio. Este resultado coincide con el criterio de varios autores, quienes adoptaron este valor para *Eucalyptus* spp. en Uruguay.

**CUADRO 12.** Coeficiente de variación del volumen y error de muestreo según factor de forma comercial usando altura comercial utilizado en muestreo Bitterlich.

Factor de forma utilizado	Coeficiente de variación (%)	Error de muestreo (%)
FF árbol en cada punto	20.07	9.4
FF clase mas frecuente	22.20	10.4
FF = 0.5	22.20	10.4

Se observó una leve diferencia en los coeficientes de variación correspondientes a valores de volumen total entre los tratamientos en los que se usa el factor de forma del árbol promedio medido en cada punto de giro y aquellos en los que se aplica el factor de forma de la clase más frecuente (Cuadro 12). Esta diferencia condiciona el error de muestreo, lo que implica que el tamaño de muestra variará en función de que factor de forma se utilice. El factor de forma del árbol promedio medido en cada punto es el que presenta menor error de muestreo para una misma cantidad de parcelas.

### **3. Muestreo Bitterlich con diferentes intensidades de muestreo**

Las diferencias entre los valores promedio en volumen son relativamente pequeñas (Cuadro 13 y Cuadro 14). No obstante, al reducir la intensidad de muestreo desde 1 punto/ha hasta 1 punto/ 4 ha los intervalos de confianza se vuelven más amplios, *i.e.* aumentan las diferencias entre límites inferior y superior.

**CUADRO 13.** Volúmenes promedio por hectárea e intervalos de confianza según intensidad de muestreo en muestreo Bitterlich.

Intensidad de muestreo	Intervalo de confianza (95%)		Promedio
	L inferior (m3/ha)	L superior (m3/ha)	Vol. com. (m3/ha)
1 punto/ ha	251,8	304,1	278,0
1 punto/ 2 ha	239,1	332,8	286,0
1 punto/ 4 ha	204,7	358,8	281,7

**Nota:** Valores calculados con el factor de forma comercial de altura comercial

Al reducir la intensidad de muestreo aumenta el error de muestreo en forma proporcional (Cuadro 14) al incremento en la amplitud de los intervalos de confianza.

**CUADRO 14.** Tabla de existencias en pie promedio del rodal, sus intervalos de confianza y errores de estimación según intensidad de muestreo en muestreo Bitterlich.

Intensidad de muestreo	Intervalo de confianza (95%)		Promedio	Error de muestreo (%)
	L inferior (m3)	L superior (m3)	Vol com tot (m3)	
1 punto/ ha	4659,1	5625,2	5142,1	<b>9,4</b>
1 punto/ 2 ha	4423,2	6157,1	5290,1	<b>16,4</b>
1 punto/ 4 ha	3786,2	6637,8	5212,0	<b>27,4</b>

Si bien todos los intervalos incluyen el valor real de volumen cosechado, sólo en la mayor intensidad de muestreo, un punto por hectárea, cumple con un error de muestreo por debajo del 10 por ciento fijado como aceptable. A menor intensidad de muestreo, la estimación se vuelve imprecisa (Gráfico 10).



**GRAFICO 10.** Error de muestreo en % según intensidad de muestreo en Bitterlich.

#### 4. Métodos de muestreo con diferentes estimadores de factor de forma

A continuación se comparan los tres métodos de muestreo combinados con los dos procedimientos de estimación de factores de forma, *FFcc* y *FFct*. En el Cuadro 15 se describen los diferentes tratamientos de estimación evaluados.

**CUADRO 15.** Tratamientos comparados mediante ANAVA, volúmenes comerciales de todos los muestreos usando todos los factores de forma

Tratamiento	Método de Muestreo	Factor de Forma	Observaciones
1	Bitterlich	<i>FFcc</i>	Según <i>DAP</i> del árbol medio en cada punto
2	Bitterlich	<i>FFcc</i>	<i>FF</i> de la clase más frecuente
3	Bitterlich	<i>FFcc</i>	0,5
4	MAS	<i>FFcc</i>	
5	MS	<i>FFcc</i>	
6	Bitterlich	<i>FFct</i>	Según <i>DAP</i> del árbol medio en cada punto
7	Bitterlich	<i>FFct</i>	<i>FF</i> de la clase más frecuente
8	MAS	<i>FFct</i>	
9	MS	<i>FFct</i>	

Se observaron diferencias significativas sólo entre valores de volumen comercial estimados según el Tratamiento 8 y los demás ( CUADRO 16).

**CUADRO 16.** Comparación de volúmenes comerciales de nueve tratamientos de cálculo (diferentes métodos de muestreo y factores de forma).

Tratamiento	Volumen comercial m <sup>3</sup> / ha	
2	293,00	A
1	277,95	A
3	272,52	A
5	270,87	A
6	260,83	A
7	260,12	A
4	256,00	A
9	249,03	A
8	238,13	B

El Tratamiento 2 (muestreo Bitterlich usando  $FF_{cc}$  de la clase diamétrica más frecuente) resulta en el valor más alto de volumen comercial estimado entre el conjunto de promedios comparados, sin diferencias significativas con el resto de los tratamientos, excepto el Tratamiento 8. No obstante, el valor real cosechado (4730 m<sup>3</sup>) no se halla incluido en el intervalo de confianza del Tratamiento 2 (Tratamiento 4 en el Cuadro 11). Esto puede explicarse debido a que la clase de  $DAP$  más frecuente utilizada para el cálculo del  $FF_{cc}$  puede sobrestimar el verdadero valor del factor de forma.

## D. CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA

Como se puede apreciar en el Cuadro 17, el *DAP* promedio del muestreo Bitterlich (MB) es un 11.24% mayor para dicha variable estimada por los métodos de muestreo aleatorio (MAS) y sistemático (MS). Esta diferencia se debe a que en el muestreo Bitterlich, los árboles incluidos para el cálculo del *DAP* promedio son elegidos de manera subjetiva, lo que genera un sesgo difícil de evitar y predecir en la estimación. Es por esto que la elección correcta del árbol promedio en cada giro es de vital importancia.

**CUADRO 17.** Caracterización cuantitativa por árbol, por hectárea y total del rodal según tipo de muestreo

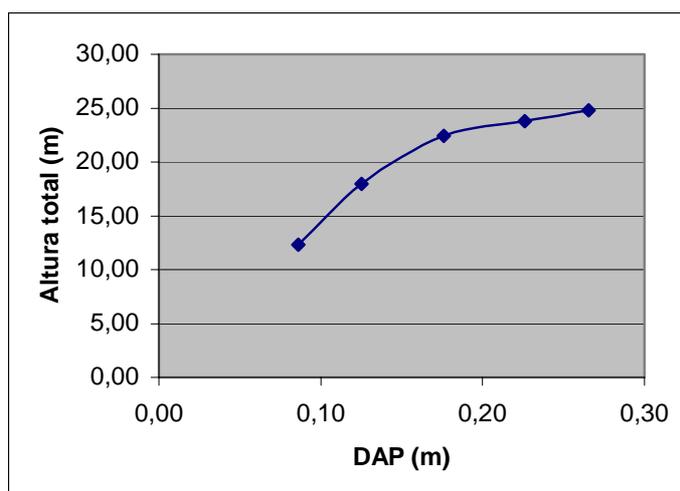
Parámetros cuantitativos	Muestreo Aleatorio (MAS)	Muestreo Sistemático (MS)	Muestreo Bitterlich	Diferencia en % Muestreo Bitterlich vs MAS	Diferencia en % Muestreo Bitterlich vs MS
<i>DAP</i> promedio (m)	0,178	0,178	0,198	11,24%	11,24%
Área basal promedio (m <sup>2</sup> / árbol)	0,0263	0,0264	0,0307	16,73%	16,29%
Área basal promedio (m <sup>2</sup> / ha)	28,94	29,65	30,45	5,22%	2,70%
Altura comercial promedio (m)	17,01	17,40	17,76	4,41%	2,07%
Altura total promedio (m)	22,41	22,74	23	2,63%	1,14%
Volumen promedio por árbol usando FFcc (m <sup>3</sup> )	0,241	0,247	0,293	21,58%	18,62%
Volumen promedio por árbol usando FFct (m <sup>3</sup> )	0,218	0,222	0,26	19,27%	17,12%
Volumen promedio por ha usando FFcc (m <sup>3</sup> )	256,00	270,87	277,95	8,57%	2,61%
Volumen promedio por ha usando FFct (m <sup>3</sup> )	238,13	249,03	260,83	9,53%	4,74%
Volumen promedio total usando FFcc (m <sup>3</sup> )	4736	5011	5142	8,57%	2,61%
Volumen promedio total usando FFct (m <sup>3</sup> )	4405	4607	4825	9,53%	4,73%

Las diferencias observadas en la estimación de área basal promedio individual entre los métodos MB, MAS y MS son 16.73 y 16.29 por ciento, respectivamente, mayores a las calculada para *DAP*. Estas diferencias se asocian con la estimación del número de árboles por hectárea en el MB, calculado dividiendo en área basal promedio por hectárea sobre el

área basal individual media. El denominador se calcula con el valor de *DAP* elevado al cuadrado, lo que se asocia a mayores diferencias porcentuales entre los resultados del MB respecto a MAS y MS. El volumen promedio individual también depende de la estimación del número de árboles por hectárea como en las dos variables anteriores.

Las diferencias entre valores de altura total estimada según el método Bitterlich y los restantes son muy pequeñas y no son relevantes en el cálculo de volúmenes totales.

Las diferencias en porcentaje entre las estimaciones de alturas promedio y *DAP* promedio dependen de la relación entre ambas variables. Un aumento de una unidad en *DAP* no representa un aumento proporcional en altura total (Gráfico 11), sino que los incrementos serán progresivamente menores.



**GRAFICO 11.** Altura total en función del *DAP*

En resumen, lo más importante que se desprende del cuadro es que la subjetividad en la elección del árbol medio en el muestreo Bitterlich puede afectar de manera apreciable el volumen por árbol y consecuentemente el volumen total por hectárea, ya que el *DAP* es un factor de mucho peso en el volumen. A pesar de existir una diferencia del *DAP* promedio apreciable entre el muestreo Bitterlich con los demás muestreos, se pudo observar en paginas anteriores que no hubo diferencias significativas en las medias de volúmenes comerciales, pero si se observó que en el muestreo Bitterlich los valor de volumen para todos los casos son mayores con respecto a los demás muestreos. Una diferencia mayor en el *DAP* promedio seguramente dará resultados muy alejados al valor verdadero.

## V. CONCLUSIONES

### A. CONCLUSIONES

#### **Volumen**

- 1) No hubo diferencias estadísticamente significativas entre las medias de volúmenes estimados mediante muestreo Bitterlich, muestreo aleatorio simple (MAS) y muestreo sistemático (MS).
- 2) No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los valores de área basal medidos con el relascopio de Bitterlich y aquellos calculados mediante los otros métodos de muestreo
- 3) Si bien la elección de un único árbol medio, representativo de cada parcela Bitterlich, produjo resultados satisfactorios, esta selección es crucial por lo que implica en la estimación del volumen
- 4) Todos los procedimientos para el cálculo de factores de forma en el muestreo Bitterlich resultaron apropiados en la estimación de volumen; no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos.
- 5) Sin embargo, el factor de forma calculado considerando altura comercial de la clase diamétrica más frecuente generó un intervalo de confianza cuyo límite inferior es mayor que el volumen real cosechado, i.e. sobrestima dicho valor.
- 6) El factor de forma 0.5 es adecuado para estimar volumen (usando altura comercial) en el muestreo Bitterlich, pero no debe ser interpretado como un valor que se pueda extrapolar a otras situaciones
- 7) No se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre el factor de forma que considera altura comercial y el que considera altura total, por lo que pueden ser usados indistintamente para el cálculo de volumen en cualquiera de los métodos de muestreo estudiados.
- 8) En muestreo Bitterlich, la mínima intensidad de muestreo aceptable, que no superó el error de muestreo establecido de antemano (10%) fue 1 parcela por hectárea. Una parcela cada 2 ha y cada 4 ha resultaron en errores de muestreo superiores a 10% e intervalos de confianza excesivamente amplios.

#### **Tiempos**

- 9) En cuanto a tiempo promedio de búsqueda de parcela, no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tres métodos de muestreo. Tampoco se observó diferencias significativas entre los tiempos totales (búsqueda y medición) promedio de parcelas de MAS y MS.

- 10) El muestreo Bitterlich insumió un tiempo promedio 9 veces menor en la marcación y medición de los árboles por parcela respecto a los otros dos métodos de muestreo. Si a este tiempo se suma el tiempo que toma la búsqueda de la parcela, el muestreo Bitterlich toma 3.6 veces menos tiempo en comparación con MAS y MS.
- 11) Existen diferencias de tiempo y de costos de mediciones en muestreo Bitterlich en comparación con MAS y MS en relación al número de árboles con que se estiman factores de forma; en el primer caso, se miden individuos de la clase diamétrica a la que pertenecen los árboles medios y en el segundo, se estima un factor de forma por clase diamétrica.
- 12) En el muestreo Bitterlich, el tiempo de búsqueda de cada parcela fue el doble que el tiempo de medición de los DAP. En los otros dos métodos de muestreo, el tiempo de medición duplicó el tiempo de búsqueda y replanteo de la parcela.

#### **Arc View y GPS**

- 13) En los tres métodos de muestreo, el uso del programa Arc View en la elaboración de planes y de GPS para búsqueda de parcelas permitió una planificación efectiva y una ejecución eficiente del inventario
- 14) Las desventajas del MAS relativas a los tiempos y a las dificultades de replanteo de las parcelas fueron obviadas debido a la adopción del programa Arc View y del GPS.

### **B. RECOMENDACIONES**

Si se analizan en conjunto los resultados de los tiempos con los resultados estadísticos de los volúmenes de todos los muestreos se puede ver claramente que el muestreo Bitterlich fue el mas efectivo en este trabajo.

La ventaja de este muestreo con los otros radica principalmente por el menor tiempo que insume su realización, y por lo tanto incurre en menores costos y se puede aumentar el número de parcelas disminuyendo el error. El tiempo de hacer una parcela en este estudio fue casi 9 veces mas rápido que en los otros muestreos. Si se considera el tiempo de búsqueda de la parcela esa diferencia se reduce, pero de todas formas fue 3.6 veces mas rápido que los otros muestreos.

Otra ventaja que presentó el método en este trabajo fue el tiempo que insumió la determinación del factor de forma. Como se mencionó en párrafos anteriores la determinación del factor de forma es para una o dos clases diamétricas solamente. Depende de si optamos por el factor de forma de la clase mas frecuente o por los factores de forma de las clases diamétricas que abarquen los Dap de los árboles medios medidos en cada punto.

También es importante resaltar que para dicho muestreo no se incurrió a un trabajo previo con ArcView y por lo tanto contribuyó aún mas a una reducción del tiempo total del inventario y a la facilidad de implementación.

Si bien el muestreo Bitterlich parece ser un muestreo bastante eficiente es necesario hacer una serie de consideraciones y recomendaciones para asegurar un buen resultado como se detalla a continuación:

- La determinación del área basal a través del relascopeo de Bitterlich es muy precisa si se toma la precaución de elegir un correcto FAB para el rodal que se trabaje y observar atentamente cada árbol para ver si su dimensión entra, no entra o iguala a la banda elegida.
- Es muy importante prestar atención que en cada árbol se esté mirando a la altura del *DAP* y no confundirse por restos de corteza o defectos en el fuste que puedan incluir un árbol cuando en realidad no entraría y por lo tanto se estaría sobrestimando el valor real. Otra precaución a tener en cuenta es observar que el árbol incluido no esté seco o sea demasiado pequeño y por lo tanto no sea comercial.
- Una de las partes más importantes a tener en cuenta en el muestreo Bitterlich es en la dedicación detenida y precisa en la elección del árbol medio en cada punto para no generar luego, sesgo en los cálculos.
- La medición en altura del diámetro mínimo comercial con el relascopeo de Bitterlich se hace dificultosa por la poca visibilidad debido a las ramas y copas cuando los árboles son altos y están muy juntos. Una solución a este problema que por cierto consume bastante tiempo es medir la altura total en vez de la comercial puesto que es menos engorrosa y más rápida de medir. La parte no comercial la descontamos luego en el factor de forma.
- Si bien en este trabajo el muestreo Bitterlich no se planificó en ArcView para hacerlo mas sencillo aún, es recomendable hacerlo cuando los recursos los permitan. Es importante resaltar que con un programa de SIG se puede incluir, combinar, manipular y manejar mucha información como ser mapas topográficos, mapa de suelos, fotografías aéreas, imágenes satelitales, etc permitiendo realizar una planificación del inventario mucho mas elaborada y precisa y por lo tanto mas eficiente.

Con respecto a los otros muestreos se puede mencionar que son menos efectivos por el tiempo que insumen generando mayores costos al inventario. De todas formas son métodos muy buenos y precisos, y posiblemente más confiables que el muestreo Bitterlich.

Cuando por alguna razón el muestreo Bitterlich no pueda ser aplicado estos métodos de muestreos son la alternativa. Un problema que puede presentarse en el muestreo Bitterlich como ya fue mencionado es en la elección del árbol medio en cada punto. Si no se cuenta con personal de experiencia en inventarios los resultados pueden tener errores considerables.

Otro aspecto importantísimo a considerar en un inventario independientemente del método que se vaya a utilizar es la detección y el estudio detallado de todos los errores muestrales que pueden generarse. Cada rodal y sitio presentan condiciones diferentes y es necesario estudiarlas para evitar sesgos grandes en los resultados.

## VI. RESUMEN

Se comparó eficiencia de tres métodos de muestreo (Bitterlich, muestreo aleatorio simple y muestreo sistemático) en inventarios forestales, desde puntos de vista estadístico y de tiempo insumido, en un rodal de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* en Maldonado (TILE FORESTAL S.A.). En los muestreos aleatorio simple y sistemático se calculó tamaño mínimo de muestra. En el muestreo Bitterlich se probó con tres intensidades de muestreo, a) un giro por hectárea, b) un giro cada 2 ha y c) un giro cada 4 ha. La planificación de los muestreos se realizó con el programa Arc View. El trazado del mapa del rodal y la ubicación de parcelas se realizaron con la ayuda de un GPS. En los tres métodos de muestreo se calcularon volúmenes comerciales utilizando dos factores de forma comerciales, determinados considerando altura total y altura comercial. En el muestreo Bitterlich en particular, se estimó volumen usando factores de forma comerciales de la clase diamétrica del árbol medio y la clase diamétrica promedio en cada giro y finalmente, se utilizó 0.5 como factor de forma. Se estimaron intervalos de confianza (95%) para las medias de volumen comercial. Estos valores fueron comparados con volúmenes comerciales cosechados, medidos con xilómetro. Se registró para cada muestreo tiempo discriminado según etapas. Se realizaron análisis de varianza para las variables volumen comercial y tiempos de muestreo. El uso del programa Arc View y del GPS permitió planificar y ejecutar el inventario de modo eficiente. No se observó diferencias estadísticamente significativas entre valores de área basal determinados con muestreo Bitterlich y con los otros métodos de muestreo. No hubo diferencias estadísticamente significativas entre métodos de muestreo en cuanto a volumen comercial, ya fueran estimados con factor de forma comercial de altura total como de altura comercial. Estos factores de forma pueden ser usados indistintamente para calcular volumen en los métodos de muestreo estudiados. No se halló diferencias estadísticamente significativas entre valores promedio de tiempo total de muestreo por parcela para muestreos aleatorio simple y sistemático. Tampoco hubo diferencias entre tiempos promedio de búsqueda de parcela de los métodos de muestreo. En el muestreo Bitterlich el tiempo promedio de búsqueda de la parcela fue el doble que el tiempo promedio de medición. En los otros dos métodos de muestreo el tiempo de mediciones fue el doble respecto al tiempo de búsqueda y marcación de la parcela. El tiempo promedio total por parcela y el tiempo por parcela sin considerar tiempo de búsqueda fue respectivamente 3.6 veces y 9 veces menor en el muestreo Bitterlich respecto al tiempo promedio total de los otros dos métodos. El tiempo de planificación, búsqueda y replanteo de parcelas a campo en muestreo aleatorio simple fue similar al de los otros métodos debido al uso del programa Arc View y del GPS. En general todos los factores de forma probados en el muestreo Bitterlich resultaron aptos para el cálculo de volumen, por no haber diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Sin embargo, no se debería extrapolar el valor 0.5 a otros casos. El factor de forma comercial de la clase más frecuente, considerando altura comercial generó un intervalo de confianza que no comprende el valor real cosechado y tiende a sobrestimarlo. Si bien la elección de un único árbol medio en cada parcela Bitterlich da resultados aceptables, debe hacerse con precaución, dada la implicancia que tiene en el cálculo de volumen. Entre las

intensidades de muestreo Bitterlich probadas, sólo un punto por hectárea no superó el error de muestreo prefijado (10%); con las intensidades menores se observó un aumento excesivo del intervalo de confianza.

Palabras clave: Muestreo; Bitterlich; Aleatorio; Sistemático; Factor de forma; Altura comercial; Altura total

## VII. SUMMARY

Efficiency of three sampling methods (Bitterlich, unrestricted random sampling and systematic sampling) were compared, from a statistic and economic viewpoint, in a *Eucalyptus globulus* ssp. *Maidenii* in Maldonado, Uruguay (TILE FORESTAL S.A.). In both unrestricted random sampling and systematic sampling, minimum size of the sample was calculated. Bitterlich sampling was tried on three intensities: a) one plot per hectare; b) one plot per two hectares; c) one plot per four hectares. Sampling planning was done on Arc View software. Stand map drawing and plot location was done with a GPS software as a guide. Commercial volumes were calculated, on the three sampling methods, by using two commercial factors, both determined by considering total height and commercial height. Particularly on the Bitterlich sampling, volume was estimated by using commercial factors of the diametrical class of the medium tree and the average on every turn of the diametrical class, and finally, 0.5 was used as a factor. Trust intervals (95%) were estimated for the average of commercial volume. These values were compared to cropped commercial volumes, measured with a xilometre. Time divided by stages on each sampling was registered. Analysis was performed for the variables commercial volume and sampling time. Planning and execution of the inventory in an efficient way was allowed by the use of Arc View and GPS software. Meaningful statistic differences between area values determined by Bitterlich sampling and by the other sampling methods were not observed. Meaningful statistic differences between sampling methods regarding commercial volumes, estimated by commercial factor of either total height or commercial height were not discovered. The volume of the tried sampling methods can be calculated by using these factors indistinctly. Meaningful statistic differences between the average values of total sampling time for each parcel for both unrestricted random sampling and systematic sampling were not found. Neither were there differences between the average time of parcel search of the sampling methods. In the Bitterlich sampling the average time of parcel search doubled the average measurement time. In the other sampling methods the measurement time doubled the search time and setting of the parcel. The total average of time for parcel and the time for parcel without considering the time search was 3.6 and 9 times less respectively, in the Bitterlich sampling, with respect to the total average time of the other two methods. Planning, search and reestablishing of field parcels in the unrestricted random sampling was similar to the other methods due to the use of Arc View and GPS software. In general, all the factors tried in the Bitterlich sampling were suitable for the calculation of volume owing to the lack of meaningful statistic differences between them. Nevertheless, the 0.5 value should not be transplanted to other cases. A trust interval which do not comprise the real cropped value and which is likely to be overestimated, was generated by the commercial factor of the most frequent class, considering commercial height. Although the choice of one average tree on each Bitterlich parcel conveys acceptable results, it should be thoroughly done because of the implications it has on the volume calculation.

Keywords: Sampling; Bitterlich, Unrestricted random; Systematic; Form factors;  
Commercial height; Total height.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. FAO, Roma. v.2, 80 p.
2. AVERY, T. E. 1967. Forest measurements. New York, Mc Graw-Hill. 290 p.
3. BITTERLICH, W. s.f. Spiegel-relaskop. Salzburg, Austria, s.e. part.1, 28 p.
4. \_\_\_\_\_. 1984. The relascope idea. London, Commonwealth Agricultural Bureaux. 242 p.
5. BONILLA, J. A. 1969. Aplicación del principio de Bitterlich en la determinación del área basal; evaluación de su eficacia. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Agronomía. Boletín no 106. 20 p.
6. BRUCE, D.; SCHUMACHER, F. X. 1965. Medición forestal. México, CRAT. 475 p.
7. CABRELLI, D. A. 1993a. Comportamiento del factor de forma en las poblaciones forestales y algunos métodos para su estimación. s.l., Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. s.p.
8. \_\_\_\_\_. 1993b. Diseño estadístico del muestreo en la estimación de las principales características forestales. s.l., Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. s.p.
9. CLUTTER, J. L.; FORSTON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. 1983. Timber management; a qualitative approach. New York, Wiley. 333 p.
10. DIAZ, L.; GERONA, H.; GOMEZ, S.; MASLIAH, R. 1998. Determinación de factores de corrección en sistemas de información de inventario forestal, para la empresa Arazatí S.A. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 130 p.
11. FAO (ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN). 1976. Curso FAO/ Finlandia de entrenamiento en Inventario forestal. 452 p.
12. HUSCH, B. 1963. Forest mensuration and statistics. New York, Ronald. 474 p.

13. LOESTCH, F.; HALLER, K. E. 1964a. Forest inventory. Munchen, BLV Verlagsgesellschaft. v. 1, 436 p.
14. \_\_\_\_\_.; ZÖHRER, F. AND HALLER, K. E. 1964b. Forest inventory. Munchen, BLV Verlagsgesellschaft. v. 2, 469 p.
15. PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. 1997. Mensura forestal. San José, Costa Rica, IICA/ GTZ. 561 p.
16. SORRENTINO, A. 1994. Manual teórico-práctico del Curso de Dasometría. Técnicas e instrumentos de medición forestal. 3<sup>a</sup>. reimp. Montevideo, Facultad de Agronomía. v. 1, 100 p.
17. \_\_\_\_\_. 1997. Manual para el diseño y ejecución de inventarios forestales. Montevideo, Hemisferio Sur. 350 p.
18. TORRES, J. M.; MAGAÑA, O. S. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. México, Limusa. 472 p.
19. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN GENERAL FORESTAL. 2005. Boletín estadístico. Montevideo. Consultado 15 ene. 2006. Disponible en [http:// www.mgap.gub.uy/Forestal/DGF.htm](http://www.mgap.gub.uy/Forestal/DGF.htm)
20. VOULMINOT, C.M. 1988. Factores de conversión volumétricos para Pino elliottii (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) en Puerto Arazatí (Rincón del Pino) Departamento de San José. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 131 p.

## IX. ANEXOS

Planilla de campo para relevamiento de datos para calcular factor de forma

### Planilla de toma de datos para Factor de Forma

Fecha:	Árbol N° :
Propietario:	Clase de
Localidad:	DAP:
Especie:	DAP 1:
Edad:	DAP 2:
Marco plantación:	Altura
	total:
	Altura
	comercial:
	Largo total
	en el
Suelo:	suelo:
Pendiente:	Operarios:
Sanidad:	

Largo en el suelo (metros)	Diámetros con corteza (centímetros)		Diámetros sin corteza (centímetros)		Observaciones
	d1	d2	d1'	d2'	





ANAVA de los 3 métodos de muestreo usando FFcc, según el programa SAS (3 tratamientos).

The SAS System

Analysis Variable : VOL

N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
60	268.2733333	49.8680390	170.3000000	381.9000000

The SAS System

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
MET	3	1 2 3

Number of observations in data set = 60

The SAS System

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: VOL

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	5020.305333	2510.152667	1.01	0.3707
Error	57	141702.152000	2486.002667		
Corrected Total	59	146722.457333			
	R-Square	C. V.	Root MSE		VOL Mean
	0.034216	18.58546	49.85983		268.2733

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
MET	2	5020.305333	2510.152667	1.01	0.3707

The SAS System  
 General Linear Models Procedure  
 Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: VOL  
 NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.  
 Alpha= 0.05 df= 57 MSE= 2486.003  
 Critical Value of Studentized Range= 3.403  
 Minimum Significant Difference= 37.942  
 Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	MET
A	277.95	20	3
A	270.87	20	2
A	256.00	20	1

ANAVA de los 3 métodos de muestreo usando FFcc y FFct, según el programa SAS (6 tratamientos).

The SAS System

Analysis Variable : VOL

N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
120	258.8008333	49.0703739	162.5000000	381.9000000

The SAS System  
 General Linear Models Procedure  
 Class Level Information

Class	Levels	Values
MET	6	1 2 3 4 5 6

Number of observations in data set = 120

The SAS System  
 General Linear Models Procedure

Dependent Variable: VOL

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	20943.17742	4188.63548	1.80	0.1188
Error	114	265597.11250	2329.79923		
Corrected Total	119	286540.28992			

	R-Square	C. V.	Root MSE	VOL Mean
	0.073090	18.65063	48.26799	258.8008

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
MET	5	20943.17742	4188.63548	1.80	0.1188

The SAS System  
 General Linear Models Procedure  
 Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: VOL  
 NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.  
 Alpha= 0.05 df= 114 MSE= 2329.799  
 Critical Value of Studentized Range= 4.099  
 Minimum Significant Difference= 44.246

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	MET
A	277.95	20	3
A	270.87	20	2
A	260.83	20	6
A	256.00	20	1
A	249.03	20	5
A	238.13	20	4

ANAVA del volumen por hectárea en muestreo Bitterlich usando tres FFcc y dos FFct, según el programa SAS (5 tratamientos).

The SAS System

Analysis Variable : VOL

N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
100	272.8830000	57.4176583	158.4000000	418.0000000

The SAS System

General Linear Models Procedure  
 Class Level Information

Class	Levels	Values
MET	5	1 2 3 4 5

Number of observations in data set = 100

The SAS System

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: VOL

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	14775.78960	3693.94740	1.13	0.3489
Error	95	311606.17150	3280.06496		
Corrected Total	99	326381.96110			
	R-Square	C. V.	Root MSE		VOL Mean
	0.045271	20.98769	57.27185		272.8830
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
MET	4	14775.78960	3693.94740	1.13	0.3489

The SAS System

General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: VOL

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.

Alpha= 0.05 df= 95 MSE= 3280.065  
 Critical Value of Studentized Range= 3.933  
 Minimum Significant Difference= 50.364

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	MET
A	293.00	20	2
A			
A	277.95	20	1
A			
A	272.52	20	3
A			
A	260.83	20	4
A			
A	260.12	20	5

ANAVA del volumen por hectárea de los 3 métodos de muestreo usando FFcc y FFct, según el programa SAS (9 tratamientos).

Tratamientos

Tratamiento	Método de Muestreo	Factor de Forma
1	Muestreo Bitterlich	FFcc
2	Muestreo Bitterlich	FFcc
3	Muestreo Bitterlich	FFcc
4	MAS	FFcc
5	MS	FFcc
6	Muestreo Bitterlich	FFct
7	Muestreo Bitterlich	FFct
8	MAS	FFct
9	MS	FFct

The SAS System

Analysis Variable : VOL

N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
180	264.2716667	53.3288431	158.4000000	418.0000000

The SAS System

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
MET	9	1 2 3 4 5 6 7 8 9

Number of observations in data set = 180

The SAS System

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: VOL

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	42746.54900	5343.31862	1.96	0.0543
Error	171	466323.27650	2727.03670		
Corrected Total	179	509069.82550			
	R-Square	C. V.	Root MSE		VOL Mean
	0.083970	19.76036	52.22104		264.2717

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
MET	8	42746.54900	5343.31862	1.96	0.0543

The SAS System

General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: VOL

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.

Alpha= 0.05 df= 171 MSE= 2727.037  
 Critical Value of Studentized Range= 4.443  
 Minimum Significant Difference= 51.885

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	MET
A	293.00	20	2
B A	277.95	20	1
B A	272.52	20	3
B A	270.87	20	5
B A	260.83	20	6
B A	260.12	20	7
B A	256.00	20	4
B A	249.03	20	9
B	<b>238.13</b>	20	8

ANAVA del tiempo de búsqueda de parcela de los 3 métodos de muestreo según el programa SAS (3 tratamientos).

The SAS System

Analysis Variable : TIEMPO

N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
60	8.8583333	2.7216827	2.0000000	16.0000000

The SAS System

General Linear Models Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
MET	3	1 2 3

Number of observations in data set = 60

The SAS System

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: TIEMPO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	30.80833333	15.40416667	2.16	0.1245
Error	57	406.23750000	7.12697368		
Corrected Total	59	437.04583333			
	R-Square	C. V.	Root MSE	TIEMPO Mean	
	0.070492	30.13704	2.669639	8.858333	

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
MET	2	30.80833333	15.40416667	2.16	0.1245

The SAS System

General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for variable: TIEMPO

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGWQ.

Alpha= 0.05 df= 57 MSE= 7.126974  
 Critical Value of Studentized Range= 3.403  
 Minimum Significant Difference= 2.0315

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	MET
A	9.4500	20	2
A	9.2750	20	3
A	7.8500	20	1