

# Inventario forestal bietápico-bifásico combinado

Combined two-stage-two-phase forest inventory

C.D.O.: 524.6; 587.

VICTOR SANDOVAL V.

Facultad Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile,  
Casilla 567, Valdivia, Chile.

## SUMMARY

This paper presents an inventory method for natural forests, using a double-sampling scheme with data from plots as well as aerial photographs. This method proved useful for assessment of native forest timber volume.

## RESUMEN

Se presenta una metodología de inventarios forestales desarrollada sobre bases de un esquema de doble muestreo, terrestre-fotogramétrico, tendiente a optimizar el proceso de evaluación de existencia en el bosque natural chileno.

## INTRODUCCION

La utilización racional de los recursos naturales sobre bases técnicas, ecológicas y económicas requiere de un flujo de información permanente sobre variables del bosque como superficie, volumen, crecimiento, etc.

El problema esencial en la captación de esta información en los países latinoamericanos es el alto costo en que se incurre al movilizar profesionales con equipos especializados a extensas zonas carentes de acceso y de condiciones topográficas difíciles.

El empleo de sensores remotos, como imágenes satélites o fotografías aéreas verticales, permite en un alto grado superar esta problemática, optimizando el uso de los recursos humanos y técnicos, como también mejorando la representatividad del muestreo terrestre. Si además de utilizar las ventajas que proporcionan los sensores remotos se emplean métodos de muestreos que optimicen el trabajo de campo, como son los esquemas multifásicos y multietápicos, se puede encontrar en muchos casos una alternativa apropiada para la evaluación física de estos recursos.

Aunque los métodos de muestreo multietápico y multifásico son bastante conocidos, en el último tiempo, y con el creciente empleo de imágenes

satelitales y otros sensores remotos en el ámbito de inventarios forestales, éstos han tenido un nuevo impulso, principalmente debido a las nuevas combinaciones de muestreo posibles de realizar (Rhody, 1981; Saborowski, 1991).

La ventaja del método de muestreo multietápico respecto al esquema sistemático o al azar es la concentración del trabajo terrestre en bloques (unidades primarias), donde se distribuye y mide solamente una submuestra o unidades secundarias (Saborowski, 1992).

En el muestreo multifásico, en cambio, se aprovecha el bajo costo en la determinación de variables auxiliares sobre un gran número de unidades muestrales (ejemplo fotoparcels), las que en un número reducido son comprobadas y medidas en terreno. Las variables auxiliares (fotogramétricas) se relacionan con variables objetos (ejemplo volumen terrestre) mediante estimadores de razón o de regresión (Akca, 1984). El empleo de este método tiene sentido sólo si la medición de unidades de muestreo fotogramétricas es de menor costo que las parcelas de muestreo terrestre, o si el incremento de exactitud en la estimación de la variable objeto obtenida a través de los estimadores de regresión es mayor a la pérdida de exactitud debido a la disminución del muestreo terrestre (Akca, 1984). Debido a esto el empleo del método

dependerá de la razón de costo entre unidades de muestreo terrestre y fotogramétricas y de la correlación entre variables auxiliar y objeto.

En este trabajo se investiga la aplicación de estos métodos muestreo en inventarios forestales, combinando ambos esquemas de manera de incrementar las ventajas en un uso conjunto de los dos sistemas.

### ASPECTOS METODOLOGICOS

Las ventajas que ofrece el método de muestreo multietápico pueden ser incrementadas si en la segunda o tercera etapa se utilizan procesos multifásicos, como por ejemplo, combinando mediciones fotogramétricas con información terrestre en una segunda fase (figura 1).

Las mediciones fotogramétricas y terrestres en las submuestras indicadas en los puntos 2 y 3 del proceso bifásico se explican a continuación.

*Mediciones fotogramétricas.* Las mediciones fotogramétricas fueron realizadas con el restituidor digital 11/18 DSR de la firma KERN. Las variables medidas en los modelos estereoscópicos escala 1:18.000 fueron las siguientes:

- Altura promedio de árboles dominantes y codominantes por unidad de muestreo fotogramétrico.
- Número de copas del estrato superior del bosque.
- Porcentaje de cobertura de copas.

Con el instrumento Kern, al contrario de los

llamados restituidores analógicos mecánicos, se realiza el proceso de orientación interna, relativa y absoluta en forma simple, mediante sistemas computarizados en un promedio de 20 minutos de tiempo por par estereoscópico. En un restituidor analógico mecánico, este proceso demora alrededor de 8 horas.

Después de la orientación del par fotográfico, se origina un modelo matemático de elevación, cuya representación gráfica se utiliza para la determinación de la altura de árboles u otras variables fotogramétricas mediante el uso del principio de marcas flotantes o paralaje.

En este trabajo se midió la altura de árboles pertenecientes al estrato dominante del bosque, se contabilizó el número de copas circunscritas a la parcela fotográfica y se estimó ocularmente, en una escala porcentual, el grado de cobertura de copa sobre el suelo en cada fotoparcela.

Debido a la cerrada cobertura de copas en los bosques naturales, la medición de la base de los árboles en el interior de un rodal, mediante métodos fotogramétricos, es una de las principales fuentes de error en la determinación de alturas. Para minimizar esta causa de error se diseñó la siguiente solución geométrica: determinar, con el método de paralaje sobre el modelo estereoscópico orientado, cotas de diferentes puntos ubicados en zonas cercanas a la fotoparcela, en los cuales la visibilidad del suelo a través de las copas era más adecuada. Con este conjunto de puntos, cuyas coordenadas X, Y y Z son determinadas por restitución fotogramétrica, se ajusta un plano de regresión

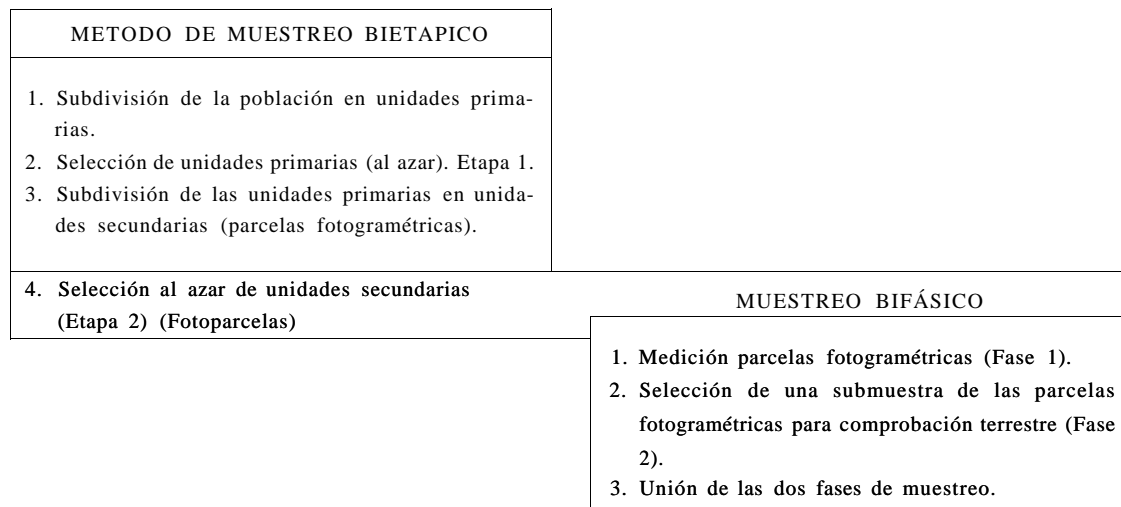


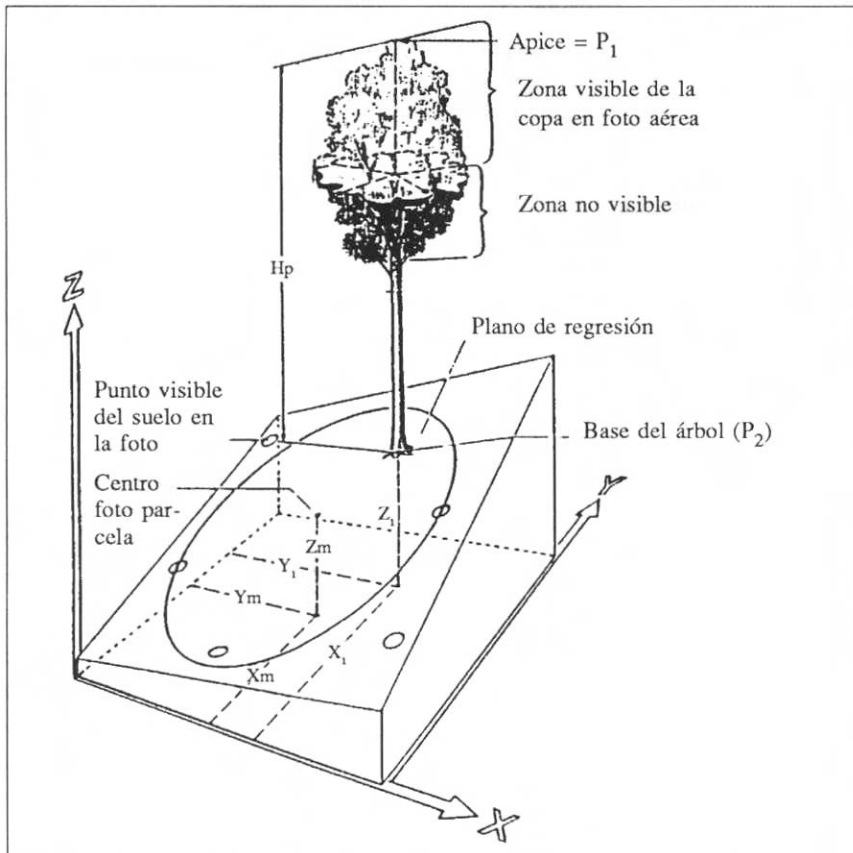
Figura 1. Diseño de muestreo multietápico-multifásico combinado. Combined two-stage-two-phase sampling design.

múltiple, el cual representa las distintas cotas topográficas del terreno (coordenada Z), en función de las variables latitud y longitud terrestre (coordenadas X e Y). Posteriormente, sólo es necesario determinar el valor de la paralaje del ápice del árbol para obtener la altura total fotogramétrica correcta. La figura 2 muestra un esquema de la solución geométrica propuesta.

*Mediciones de parámetros terrestres.* De la información terrestre determinada con técnicas convencionales de medición y proceso se obtuvieron las siguientes variables por hectárea en cada unidad muestral levantada en terreno:

- Número de árboles.
- Area basal.
- Volumen bruto.

*Estimadores poblacionales del muestreo bietápico-bifásico combinado.* Las ecuaciones para estimar los parámetros poblacionales de este diseño fueron desarrolladas combinando estimadores estadísticos definidos por Cochran (Cochran, 1977) para las técnicas de muestreo multietápica y multifásica. En el cuadro 1 se presentan las ecuaciones estimadoras de los parámetros poblacionales.



(1)

$$H_p = P_1 - P_2$$

- donde:
- $H_p$  = Altura del árbol, medida en la fotografía aérea.
  - $P_1$  = Lectura de barra de paralaje en el ápice del árbol.
  - $P_2 = Z = f(X, Y)$ , paralaje de la base del árbol, determinado en el plano de regresión.
  - $Z$  = Cota del terreno.
  - $X$  = Longitud.
  - $Y$  = Latitud.

Figura 2. Presentación esquemática del plano de regresión para la determinación del valor  $P_2$  de la base del árbol. Scheme of the regression phase to determine the  $P_2$  value of the tree base.

CUADRO 1

Estimadores poblacionales para muestreo bietápico-bifásico combinado.  
Population estimates for a combined two-stage-two phase sampling.

Nº Parámetro	Ecuación
1. Total poblacional estimado	$\hat{\phi} = F \cdot \hat{\bar{y}}$
2. Medio muestral	$\hat{\bar{y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i$
3. Varianza	$\hat{V}(\hat{\bar{y}}) = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{\bar{y}})^2}{n-1} + \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^n \left( \frac{s_{iy}^2 (1-r_i^2)}{m} + \frac{s_{iy}^2 r_i^2}{m'} - \frac{s_{iy}^2}{M} \right)$
4. Error de muestreo	$S = \sqrt{V(\hat{\bar{y}})}$

donde:

- F : Factor de expansión.
- $\frac{\hat{A}}{\hat{y}}$  (m) : Volumen medio por hectárea en la unidad primaria i, determinado mediante estimador de regresión.
- $S^2_{iy}$  : Varianza de la variable objetivo, calculada a partir de mediciones terrestres, para la unidad primaria i.
- $r^2_i$  : Coeficiente de correlación en la unidad primaria i, entre variable auxiliar y variable objetivo.
- N, M : Número total de unidades primarias y secundarias por unidad primaria.
- n, m', m : Número de unidades primarias, secundarias fotogramétricas y secundarias terrestres muestreadas.

*Optimización del método de muestreo combinado bietápico-bifásico.* El primer punto a solucionar en el proceso de optimización del método de muestreo combinado corresponde a lo siguiente: ¿es la aplicación de un esquema bifásico de muestreo más apropiado que el muestreo monoetápico en la estimación de los parámetros poblacionales de la situación boscosa a inventariar?

Cochran (1977) plantea la siguiente ecuación para responder esta disyuntiva:

$$\rho^2 \geq \frac{4 \frac{c'}{c}}{(1 + \frac{c'}{c})^2} \tag{2}$$

Donde:

- $\rho^2$  = Correlación entre variables auxiliar y objetivo.
- $c'$  = Costo de medición de una fotoparcela.

$c$  = Costo de localización y medición de una parcela terrestre.

En caso positivo, el cociente óptimo entre el número de fotoparcels  $m'$  y parcelas terrestres  $m$  queda definido por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{m}{m'} = \sqrt{\frac{(1-\rho^2)}{\rho^2} \frac{c'}{c}} \quad m = m' \cdot f \tag{3}$$

El número óptimo absoluto de unidades primarias (n), unidades secundarias fotográficas ( $m'$ ) y parcelas terrestres (m) resulta de la minimización del producto costo (C) - varianza ( $V(\hat{\bar{y}})$ ), donde:

- $C = nc' + nmc + nm'c' = n(c' + m'(cf + c'))$ .
- C = Costo total del proyecto.
- $cl$  = Costo de acceso a las unidades primarias  $n_i$ .

$$V(\hat{\bar{y}}) = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{\bar{y}})^2}{n-1} + \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^n \left( \frac{s_{iy}^2 (1-r_i^2)}{m} + \frac{s_{iy}^2 r_i^2}{m'} - \frac{s_{iy}^2}{M} \right) \tag{4}$$

$V(\hat{\bar{y}})$  = varianza de la media poblacional

En ambas ecuaciones m es reemplazado por la expresión m' f y la varianza es minimizada para costos (C) dados mediante la conocida desigualdad de Cauchy-Schwarz o, en forma inversa, son minimizados los costos para una varianza conocida.

La expresión resultante para determinar el número óptimo de fotoparcels es:

$$m' = \sqrt{\frac{c_1}{c' + fc}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sigma_{iy}^2 (1-\rho_i^2)}{f} + \sigma_{iy}^2 \rho_i^2 \right)}{\sigma_{iy}^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{iy}^2}{M}}}} \quad (5)$$

Esta expresión es estimada por la información muestral mediante:

$$\sqrt{\frac{c_1}{c' + fc}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{s_{iy}^2 (1-r_i^2)}{f} + s_{iy}^2 r_i^2 \right)}{s_{iy}^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{s_{iy}^2}{M}}}} \quad (6)$$

Finalmente, reemplazando los valores m y m' en la ecuación de la varianza  $V\left(\frac{\Delta}{V}\right)$  se obtiene el número óptimo de unidades primarias (n).

De la misma forma puede ser determinado mediante la ecuación de costo C, si el presupuesto total de proyecto es conocido.

**RESULTADOS**

1. *Muestreo bietápico terrestre tradicional.* De la información colectada en 18 unidades muestrales secundarias terrestres, distribuidas sistemáticamente en 6 unidades primarias en un área de bosque siempreverde de 600 ha en la costa de Valdivia se obtuvieron los siguientes resultados. (Cuadro 2)

Los estimadores poblacionales calculados por las fórmulas convencionales (Cochran, 1977) del muestreo bietápico son los siguientes:

CUADRO 3

Estimadores muestreo bietápico terrestre convencionales  
Common sampling estimators for two-stage terrestrial conventional

Estimador	Valor
Valor medio	408.2 m <sup>3</sup> /ha
Error de muestreo	29.9 m <sup>3</sup> /ha
Límite confidencial*	76.9 m <sup>3</sup> /ha
Unidades primarias n	6
Unidades secundarias m (total)	18

\* Límite confidencial para t (GL = N-1; p = 0.05) = 2.571).

El volumen total del área según estimación de este esquema es de 244.920 m<sup>3</sup>, con un error de ± 7.3%.

2. *Muestreo bifásico tradicional.* Para la evaluación de un esquema de muestreo bifásico en la misma área boscosa fueron medidas en una primera fase 151 fotoparcels, cuyos volúmenes se determinaron por medio de un estimador de regresión que relacionó el volumen bruto terrestre, medido en 18 parcelas terrestres (variable objetivo Fase 2 del inventario), con las variables fotogramétricas: porcentaje de cobertura de copas, diámetro de copas, altura media de los árboles dominantes y número de copas circunscritas a las fotoparcels (variables auxiliares).

Las 18 parcelas terrestres corresponden a las

CUADRO 2

Volumen bruto (m<sup>3</sup>/ha), muestreo bietápico terrestre  
Total gross volume, terrestrial two-stage sampling

Unidades secundarias N°	Unidades primarias					
	1	2	3	4	5	6
1	427.7	619.6	504.4	277.6	465.0	636.1
2	386.5	329.0	266.4	330.5	461.6	459.0
3	334.0	493.1	164.6	403.4	499.0	291.7
Promedio	382.7	480.5	311.6	337.1	475.2	462.3

Tamaño Unidad Primaria = 25 ha  
Tamaño Unidad Secundaria = 1.500 m<sup>2</sup>

unidades muestrales utilizadas tanto en el esquema bietápico como en el método bietápico-bifásico combinado, esto con el objeto de comparar resultados entre los distintos sistemas de muestreo.

La ecuación para estimar el volumen fotogramétrico, seleccionada mediante criterios estadísticos ( $r^2$ ,  $Sy_x$ , valor F) de distintos modelos probados, fue la siguiente:

$$Vf = 398.451884 - 16.70315 NC + 0.27994 NC^2 \cdot HF$$

con un coeficiente global de determinación  $r^2 = 0.76$ , error de la estimación  $Sy_x$  de  $63.7 \text{ m}^3/\text{ha}$  y un valor  $F = 24.4$ .

donde:

Vf : Volumen bruto fotogramétrico estrato superior, árboles con DAP > 40 cm (variable objetivo).

NC: Número de copas contadas en la fotoparcela (variable auxiliar 1).

HF: Altura media de árboles dominantes y codominantes, medida en el modelo estereoscópico (variable auxiliar 2).

Los resultados obtenidos con este esquema de muestreo se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 4

Estimadores poblacionales, muestreo bifásico  
Population estimates of the two double sampling

Estimador	Valor
Volumen medio	409.5 $\text{m}^3/\text{ha}$
Error de muestreo	16.6 $\text{m}^3/\text{ha}$
Intervalos de confianza	34.8 $\text{m}^3/\text{ha}$
N fotoparcels (Fase 1)	151
N parcelas terrestres (Fase 2)	18

Con este método el volumen total fue estimado en  $245.700.0 \text{ m}^3$  en el error de muestreo es 4.3%.

3. *Muestreo bietápico-bifásico combinado.* La misma superficie boscosa muestreada con los métodos anteriores fue dividida en  $N = 24$  unidades primarias, cada una de 25 ha de superficie. De éstas N unidades primarias se seleccionaron  $n=6$  en la primera etapa del muestreo. En la segunda etapa se subdividió cada unidad primaria en  $M = 166$  unidades secundarias (fotoparcels) de  $1.500 \text{ m}^2$  de superficie, de las cuales se seleccionaron y midieron  $m' = 9$  fotoparcels por cada unidad primaria. En esta segunda etapa se emplea un proce-

CUADRO 5

Volumen en ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) método de muestreo combinado bietápico-bifásico  
Volume ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) two stage - two phase combined sampling method

SSE	Unidades de muestreo primarias											
	1		2		3		4		5		6	
NR	m'	m	m'	m	m'	m	m'	m	m'	m	m'	m
01	434.0		729.5		926.0		347.6		340.4		431.3	
02	386.7		343.9		450.4		397.9		340.0		434.5	
03	370.5		562.6		366.1		347.4		326.2		436.4	
04	350.8	334.0	576.1	619.6	468.1	504.0	373.1	277.6	438.9	465.0	656.4	636.1
05	398.3	427.6	435.8	329.0	286.8	266.4	319.5	330.5	472.9	461.6	468.6	459.0
06	300.2	386.5	461.0	493.1	244.6	164.6	460.8	403.4	379.0	499.0	256.6	291.7
07	428.4		796.4		344.0		258.6		347.6		294.6	
08	524.8		298.7		300.7		506.2		335.2		308.8	
09	513.6		342.4		281.8		417.7		258.6		263.7	
X	411.9	382.7	505.1	480.5	407.6	311.6	380.9	337.1	359.8	475.2	394.5	462.3

m' = Fotoparcels.

m = Unidad de muestreo terrestre.

SSE = Unidad de muestreo secundario.

so bifásico de muestreo, en donde las 9 fotoparcels constituyen la primera fase de medición y sólo  $m=3$  de ellas, que se levantaron en terreno, corresponden a la fase 2 de este proceso.

El cuadro 5 especifica la información volumétrica colectada en las parcelas terrestres y fotogramétricas.

En el cuadro 5 se puede apreciar el alto grado de relación entre el volumen aéreo estimado ( $m^3$ ) mediante la ecuación 7 y los valores de los volúmenes determinados en terreno ( $m^3$ ).

El cuadro 6 presenta los estimadores poblacionales obtenidos según el nuevo sistema de muestreo.

CUADRO 6

Estimadores muestreo bietápico-bifásico combinado  
Sampling estimators for combined two stage-two phase

Estimadores	Valor
Valor promedio	410.6 $m^3/ha$
Error de muestreo	19.8 $m^3/ha$
Límite confidencial	50.8 $m^3/ha$
Número unidades primarias	6
Número unidades secundarias (fotoparcels)	9
Número unidades secundarias (terrestre)	3

Al comparar los estimadores poblacionales obtenidos por este inventario piloto mediante distintos sistemas de muestreo aplicados a esta superficie boscosa (ver cuadro 7), se observa lo siguiente:

En el cuadro 7 se aprecia una mayor eficiencia (error-costo) en los esquemas bifásico y bietápico-bifásico combinado; esta conclusión, sin embargo, queda supeditada a la calidad y escala que tenga la cubierta fotográfica del área y a la disponibilidad de restituidores simples para efectuar las mediciones fotogramétricas respectivas.

## CONCLUSIONES

La inaccesibilidad del bosque natural chileno es un factor limitante en las operaciones terrestres de un inventario forestal. Para superar este factor el empleo de los métodos de muestreo multietápico y multifásico son sin duda útiles, como se demuestra en este inventario piloto. Ahora si ambos sistemas se combinan, estas ventajas se incrementan según se expone en los siguientes puntos:

- Disminución del tiempo improductivo en la localización de unidades de muestreo terrestre, debido a la aglomeración de éstas (ventajas del muestreo multietápico) y disminución del número de unidades de muestreo terrestre (ventaja del muestreo bifásico), debido a la sustitución de éstas por fotoparcels.
- En grandes áreas boscosas con dificultades de acceso, un análisis intensivo de una gran cantidad de fotoparcels (Fase 1 del muestreo bifásico) permite apreciar la representatividad del muestreo terrestre, en cuanto a la distribución de las unidades muestrales en terreno.
- La fotografía aérea ha sido utilizada hasta hoy en el proceso de inventarios forestales del bosque natural chileno sólo para la orientación

CUADRO 7

Comparación de métodos de muestreo  
Comparison of sampling methods

Estimadores	Métodos de muestreo		
	Bietápico terrestre	Bifásico	Bietápico-Bifásico combinado
Volumen medio	408.2 $m^3/ha$	409.5 $m^3/ha$	410.6 $m^3/ha$
Error de muestreo	29.9 $m^3/ha$	16.6 $m^3/ha$	19.8 $m^3/ha$
Costo para una total solución óptima*	11.200 US\$	8.584.0 US\$	7.200 US\$

\* Solución óptima para un error máximo de muestreo de 5%.  
 $C_1 = US\$ 1.200$ ;  $c = US\$ 100$ ;  $c' = US\$ 2$ .

de brigadas de medición en terreno y para la estratificación de masas forestales. Este estudio piloto presenta una nueva alternativa de uso, como es la determinación de volúmenes.

- Considerando las variables fotogramétricas medidas en este estudio preliminar, puede indicarse que la altura determinada mediante un plano de regresión múltiple presenta resultados aceptables, y que en conjunto con la variable número de copas permite obtener valores volumétricos similares a los valores medidos en terreno mediante el uso de estimadores de regresión.

Finalmente, se demuestra con este trabajo que la optimización de cualquier método de inventario forestal en el bosque nativo chileno pasa por un uso más intensivo de la fotografía aérea.

#### BIBLIOGRAFIA

- AKCA, A. 1984. "Zur Zuwachsschätzung mit Hilfe von Kronenmessungen im Luftbild", *AFJZ*, 155(6): 136-140.
- AKCA, A., HILDEBRANDT, G., REICHERT, P. 1971. "Baumhöhenmessung aus Luftbilddaten durch einfache Parallaxenmessung", *Forstw. Cbl.* 90: 201-215.
- DE VRIES, P. 1986. *Sampling Theory for Forest Inventory*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- DONOSO, C. 1981. *Tipos forestales de los bosques nativos chilenos*. Docto. FAO-PNUD, Valdivia, Chile.
- LOETSCH, F. 1969. "Grossräumige Waldinventuren durch Listenstichproben mit variablen Wahrscheinlichkeiten", *Forstarchiv*, 40(12): 229-239.
- RHODY, B. 1981. "Ein kombiniertes Verfahren zur Erfassung der natürlichen Ressourcen im Sahel/Obervolta mit Streifenbefliegungen grossmasstäbigen Luftaufnahmen und terrestrischen Kontrollstichproben", *AFJZ* 152(10): 195-200.
- SABOROWSKT, J. 1990. *Schätzung von Varianzen und Konfidenzintervallen aus mehrstufigen Stichproben, am Beispiel von Luftbild Waldschadeninventuren*. Schriften aus der Forstliche Fak. der Universität Göttingen Band 99.
- \_\_\_\_\_. 1991. *Stichprobenverfahren der Waldinventur*. Seminar Sommer Semester, Abteilung für Forstliche Biometrie und Informatik, Universität Göttingen.
- SANDOVAL, V. 1992. *Untersuchungen zur Entwicklung eines Mehrstufigen-Mehrphäsigen Inventurverfahrens unter Berücksichtigung von terrestrischen und fernerkundliche Daten, am Beispiel des immergrünen Waldes in Südhile*. Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Magister der tropischen Forstwirtschaft der Georg August Universität, Göttingen, 75 pp.