El diseño de las parcelas del Inventario Forestal Nacional y la estimación de variables dasométricas

F. Bravo; M. del Río; V. Pando; R. San Martín; G. Montero; C. Ordoñez e I. Cañellas

Capítulo 2

INTRODUCCIÓN

Los inventarios forestales a gran escala (regionales o nacionales) deben responder al reto de poder evaluar adecuadamente sistemas forestales muy diversos con un diseño que debe ser igualmente válido para masas procedentes de repoblación, con distribución regular, como para masas naturales en las que los árboles se distribuyen al azar o mediante agregados. De la misma manera, deben ser útiles tanto en masas densas como en masas con muy pocos árboles por hectárea (ej.: dehesas) o en masas distribuidas de forma lineal (ej.: plantaciones de Salicáceas). Por todo lo anterior, el tipo y forma de la parcela es un factor crucial en el diseño de todo inventario a gran escala.

Una de las primeras decisiones que se debe tomar al diseñar inventarios forestales es el tipo de parcela. Aunque existen diversas alternativas, son dos los tipos de parcelas más habitualmente utilizados: las parcelas de radio fijo y las parcelas de radio variable. El muestreo mediante parcelas de radio fijo es el método más antiguo de muestreo forestal y es el más ampliamente usado en inventarios a escala monte. Habitualmente las parcelas son de forma circular ya que para una superficie determi-

nada la probabilidad de encontrar un árbol en el borde de la parcela es menor, mientras que su tamaño depende de la densidad de la masa forestal y del objetivo del inventario. Las parcelas de radio variable tienen su origen en el desarrollo del relascopio después de la Segunda Guerra Mundial. Pronto se vio que las parcelas de radio variable son un método rápido y barato para obtener estimaciones aceptables de las variables que caracterizan las masas forestales. SCHREUDER *et al.* (1993) indican que tanto las parcelas de radio variable como las de radio fijo tienen sus ventajas y sus inconvenientes. Así, estos autores señalan que las parcelas de radio fijo son más eficientes para estimar el número de árboles por hectárea, la mortalidad, la masa incorporada y el crecimiento, mientras que las parcelas de radio variable son más eficientes para estimar el área basimétrica, el volumen y las cortas. A pesar de lo anterior las parcelas de radio variable se han utilizado con éxito para estudiar tanto el crecimiento (ZUMRAWI Y HANN, 1993; BRAVO *et al.*, 2001) como la mortalidad (ej.: HANN Y WANG, 1990; MONSERUD Y STERBA; 1999, BRAVO *et al.*, 2001). Incluso se han desarrollado modelos de producción tanto de árbol individual como de rodal completo para su uso en planificación selvícola basándose en parcelas de radio variable (HANN *et al.*, 1995; MONSERUD Y STERBA, 1999).

Otro problema que deben afrontar los inventarios a gran escala es intentar captar la variabilidad espacial de las masas. Para ello dos estrategias son las habitualmente utilizadas: utilizar parcelas de gran tamaño o disponer una serie de parcelas más pequeñas agrupadas. Ambas estrategias han sido empleadas con éxito. Además, la distancia entre parcelas dentro del grupo o "cluster" debe ser decidida con cuidado. TOKOLA Y SHRESTHA (1999) encontraron que un "cluster" de tres parcelas dispuestas sobre un triangulo equilátero de 25 metros de lado provee muy poca información adicional frente a una única parcela.

En Europa las parcelas de radio variable son habitualmente utilizadas en inventarios a gran escala. El inventario forestal nacional español (IFN) utiliza una parcela compuesta por cuatro subparcelas de radios 5, 10, 15 y 25 metros con diámetros mínimos inventariables que cambian con el radio considerado; estas parcelas se disponen sobre los nodos de la malla de coordenadas UTM de un kilómetro de lado siempre que estén poblados por vegetación forestal. El inventario forestal suizo (STIERLIN *et al.*, 1994) utiliza una parcela compuesta de dos subparcelas de radio 8 y 12,6 metros para la toma de datos dendrométricos, que se sitúa dentro de una parcela cuadrada (de 50 por 50 metros) en la que se toman datos cualitativos de la estación del rodal; estas parcelas se sitúan en los nodos de una malla de 1,4 por 1,4 kilómetros. Por su parte en Bélgica, el inventario forestal valón (RONDEUX Y LECOMTE, 2001) utiliza cuatro parcelas concéntricas de radio entre 2,25 y 18 metros para las mediciones dendrométricas y una parcela de radio 30 metros para obtener datos sobre gestión forestal sostenible; las parcelas están dispuestas sobre una malla de 1 por 0,5 kilómetros. El inventario forestal francés (BENOS, 2001; DRAPIER Y CLUZEAU, 2001) utiliza tres parcelas concéntricas de radios 6, 9 y 15 metros para la toma de datos dendrométricos y dos parcelas de radios 15 y 25 metros para la toma de datos de la estación. En todos estos casos analizados el ciclo del inventario o periodo entre mediciones sucesivas es de 10 años. Un caso particular es el inventario forestal austriaco (MONSERUD Y STERBA, 1999) que utiliza un grupo o "cluster" de cuatro parcelas de radio variable dispuestas

sobre una malla de 3,89 por 3,89 kilómetros; cada una de las parcelas está compuesta por una parcela de radio 2,6 metros para árboles de entre 5 y 10,4 cm de diámetro normal y un muestreo relascópico utilizando un BAF igual a cuatro para el resto de los árboles; además, el ciclo del inventario austriaco es de cinco años.

El diseño de parcelas de radio variable implica la necesidad de utilizar unos factores de expansión para poder conocer los resultados por unidad de superficie. Los factores de expansión son coeficientes que multiplicados adecuadamente convierten las parcelas concéntricas en estimaciones de las parcelas "reales" del radio máximo considerado en las anteriores. El factor de expansión (f_i) se define como la relación que existe entre la superficie de referencia (en general una hectárea) y la superficie de la parcela [Ecuación 1]. El uso de estos factores está plenamente justificado si se pretenden estimar existencias a una escala adecuada para planificar una política forestal nacional, pero es más problemático si se pretenden estimar distribuciones diamétricas, índices de densidad, etc, de parcelas reales. Por otra parte debe considerarse la distribución espacial de las masas forestales, que varía en función del origen de la masa y de los tratamientos selvícolas que se hayan realizado, influyendo en los resultados de la expansión.

$$[1] \qquad f_i = \frac{10.000}{\pi * R_i^2}$$

donde, R_i es el radio de la parcela. Se utiliza el valor 10.000 para referir el factor de expansión a la hectárea.

Como ya hemos comentado, las parcelas concéntricas de radio múltiple son ampliamente utilizadas en la gestión forestal. Sin embargo, el empleo de este tipo de parcelas para estimar variables de masa para cada parcela debe hacerse sobre la base del conocimiento de la influencia de factores como la distribución espacial de los árboles o la densidad sobre la citada estimación. Los datos del IFN han sido utilizados para diversos objetivos como la modelización de diferentes tipos de masas (IBÁÑEZ ULARGUI, 1987; CANTERO *et al.*, 1995; BRAVO, 1999; CAÑADAS, 2000), la caracterización dasométrica (DOMÍNGUEZ *et al.*, 2001; PRIETO *et al.*, 2001), la optimización del tamaño de parcelas de muestreo en inventarios para gestión forestal (CONDÉS Y MARTÍNEZ-MILLÁN, 2001), caracterizar distribuciones diamétricas (CONDÉS Y MARTÍNEZ-MILLÁN, 1997), combinado con otros datos para estudiar la calidad de la estación (BRAVO-OVIEDO Y MONTERO, 2001), la planificación forestal y la producción en volumen (BRAVO Y DELGADO, 2001) o de la biodiversidad (GORDILLO *et al.*, 1999 y 2001). Por tanto, es fundamental estudiar detenidamente la forma en que se estiman las variables de masa en distintos tipos de rodales forestales a partir de los datos del IFN.

El objetivo de este capítulo es evaluar el uso de los factores de expansión en el tratamiento de los datos del IFN y discutir el tamaño de parcela óptimo de modo que se puedan obtener resultados precisos al menor coste posible. En general existe consenso en considerar que las parcelas de un inventario forestal deben ser lo suficientemente grandes como para estimar adecuadamente las variables de interés. Sin embargo, aún queda una cuestión pendiente: ¿cómo de grande es suficientemente grande? Por tanto, el resto del capítulo está dedicado a comprobar el uso de los factores de expansión en la estimación de variables dasométricas de interés.

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos

Se han utilizado un total de 310 parcelas, de las que 286 son parcelas permanentes, de forma rectangular y tamaño variable, distribuidas por distintos tipos de masas forestales. Las 24 parcelas restantes son temporales de forma circular y de radio 25 metros. En todas las parcelas se midió el diámetro de todos los árboles inventariables y se situaron los mismos mediante coordenadas polares. En la Tabla 1 se puede observar la distribución y características de las parcelas utilizadas.

Además de las parcela reales se simularon parcelas con el objetivo de completar los tipos de rodales disponibles. Para ello, se han utilizando diferentes distribuciones espaciales para situación de los árboles y diferentes distribuciones diamétricas para los mismos (siempre distribuciones de Weibull, pero con diferentes parámetros de localización, escala y forma). Se han simulado un total de 896 parcelas. De ellas se seleccionaron aproximadamente la mitad (450) para distribución espacial de tipo regular y 446 para distribución espacial de tipo Poisson.

Con este objetivo, en primer lugar se definieron las características de las par-

Tabla 1. Distribución y características de las parcelas empleadas para comprobar los factores de expansión

Provincia	Sitio	Especie[1]	Origen	Radio máximo (m)	Nº de parcelas
Navarra	Sª de Urbasa	*Fs*	Natural	25	3
Vizcaya	Altube	*Fs*	Natural	25	5
La Rioja	Sª Cebollera	*Fs*	Natural	25	2
Valladolid	Viana de Cega	*Pp*	Natural	25	7
Avila	Hoyo de Pinares	*Pp*	Natural	25	5
Segovia	Navafría	*Ps*	Natural	25	2
Guadalajara	Atienza	*Ppi*	Artificial	10	10
Valladolid	Varios	*Pp*	Natural	15	19
Valladolid	Varios	*Pp*	Natural	25	11
Huelva	Varios	*Pp*	Varios	5	27
Huelva	Varios	*Pp*	Varios	10	63
Huelva	Varios	*Pp*	Varios	15	63
Huelva	Varios	*Pp*	Varios	25	39
Segovia	Navafría	*Ps*	Natural	10	6
Segovia	Navafría	*Ps*	Natural	15	6
Palencia	Páramos	*Ps*	Artificial	10	16
León	Páramos	*Ps*	Artificial	10	10
Guadalajara	Barriopedro	*Qf*	Natural	15	7
Madrid	Navacerrada	*Qp*	Natural	15	9

[1] *Fs: Fagus sylvatica L.; Pp: Pinus pinea L.; Ps: Pinus sylvestris L.; Ppi: Pinus pinaster Ait.; Qf: Quercus faginea Lamk.; Qp: Quercus pyrenaica Willd.*

celas a simular en cuanto a número de árboles por hectárea, diámetro mínimo, diámetro medio y diámetro medio cuadrático. Para el número de árboles por hectárea se seleccionaron valores aleatorios comprendidos entre dos valores extremos representativos de las masas forestales españolas (250 y 4000 árboles/ha). Como diámetro mínimo se utilizó siempre 7,5 cm, por lo cual éste fue siempre el parámetro de localización de la función de distribución de Weibull [Ecuación 2]. Los valores para el diámetro medio y para el diámetro medio cuadrático de los árboles de las parcelas se seleccionaron en el rango comprendido entre 10 y 40 cm. Estos dos valores son los que han servido para definir los parámetros de escala y forma de la función de distribución Weibull para asignar una distribución diamétrica a las parcelas.

[2] $$F(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x-a}{b}\right]^c}$$

para x>a, donde *a* es el parámetro de localización, *b* el de escala y *c* el de forma.

Para la simulación de los diámetros de los árboles se seleccionaron números aleatorios entre 0 y 1, y posteriormente a estos números se les aplicó la inversa de la función de distribución de Weibull [Ecuación 3].

[3] $$\left(d = a + b * (-\ln(1-x))^{1/c}\right)$$

Para la simulación de cada una de las parcelas de distribución espacial regular se construyó una parcela cuadrada de 50 metros de lado y sobre ella se superpuso una malla cuadrada con tantos elementos como árboles corresponderían a esa parcela de acuerdo con la densidad deseada. A continuación se eligió un punto de forma aleatoria en cada elemento de la malla y se limitó la simulación a la parcela circular de radio 25 metros inscrita dentro del cuadrado de lado 50. En el caso de la simulación de las distribuciones espaciales de tipo Poisson se construyó también una parcela cuadrada de 50 metros de lado y se calculó las coordenadas rectangulares para la posición de cada árbol utilizando distribuciones uni-

Tabla 2. Características generales de las parcelas reales y simuladas

	N[1]	$\bar{X}$	*S*	*MIN*	*Q1*	*Q3*	*MAX*
Reales							
Árboles/ha	305	444,920	426,958	27,2889	139,012	611,899	2260,000
AB[2] (m^2/ha)	305	14,468	10,409	0,6561	6,127	20,061	44,784
Poisson							
Árboles/ha	446	914,312	348,428	361,600	687,549	1074,614	2897,893
AB (m^2/ha)	446	38,607	6,995	20,964	34,010	42,533	60,512
Regular							
Árboles/ha	450	912,511	391,440	254,648	646,806	1089,893	3885,927
AB (m^2/ha)	450	38,651	7,390	19,765	33,444	43,835	59,463

[1] *N: número de observaciones, X: media de los errores relativos, S: desviación típica de los errores relativos, Q1 y Q3: primer y tercer cuartil respectivamente. MIN: valor mínimo, MAX: valor máximo, S: desviación típica.*
[2] *AB: área basimétrica en m^2 por hectárea.*

formes independientes en ambas coordenadas. Después se restringía la simulación a la parcela circular de radio 25 metros inscrita en el cuadrado de lado 50. En ninguno de los dos casos se consideró una distancia mínima entre árboles ni relaciones distancia-diámetro mínimo. Finalmente, cada una de las parcelas simuladas fue medida y expandida de acuerdo con los criterios del IFN para el total de la parcela. También se hicieron expansiones basadas únicamente en las parcelas centrales de radios 5, 10 y 15 metros respectivamente. Una vez realizadas estas cuatro expansiones se ha comparado el resultado de las diferentes expansiones para cada radio frente a los valores verdaderos de cada variable utilizando errores relativos. Las características generales del conjunto de parcelas (reales y simuladas) se muestra en la Tabla 2.

Métodos estadísticos

Se ha realizado un análisis descriptivo de los errores relativos de la estimación del número de árboles por hectárea y del área basimétrica tanto para las parcelas reales como para las parcelas simuladas con cada una de las distribuciones espaciales. El análisis descriptivo ha consistido en:

- Cálculo de las medidas descriptivas básicas: tamaño muestral, media, desviación típica, mínimo, máximo, intervalo de confianza al 95% para la media [Ecuación 4] e intervalo de predicción al 95% [Ecuación 5]

[4] $\overline{X} \pm t_{n-1,\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}$ [5] $\overline{X} \pm t_{n-1,\frac{\alpha}{2}} S\sqrt{1+\frac{1}{n}}$

- Gráfico comparativo con los diagramas de cajas (box-plot) de las parcelas reales y simuladas y cada una de las extensiones.
- Gráficos de línea de los intervalos de confianza y predicción para cada uno de los tipos de masas reales y para las distribuciones espaciales simuladas.
- Comparación de varianzas, mediante test de la F, de las sucesivas extensiones para cada uno de los tipos de masas reales y para las distribuciones espaciales simuladas.
- Comparación de varianzas, mediante test de la F, de cada una de las distribuciones espaciales simuladas para cada una de las extensiones.

RESULTADOS

Parcelas reales

Del análisis de las parcelas reales se deduce que la estimación del número de árboles por hectárea es insesgado para todos los radios de las parcelas del IFN (Tablas 3 a 6). El intervalo de confianza de la media del número de árboles por hectárea contiene el valor cero para todas las masas estudiadas excepto para las masas de pino piñonero en Huelva. Esto puede deberse a la gran variabilidad interna de estas masas. Por tanto puede asegurarse que para casi todas las masas el método de muestreo del IFN permite obtener una estimación aceptable de esta variable. Los errores relativos promedios con la parcela completa del IFN (25 metros de radio) son próximos al 10%, excepto para las masas de pino piñonero en Huelva que se disparan hasta casi un 40%. En la Figura 1 se pueden observar las características de los errores relativos en la estimación del número de árboles por hectárea.

Tabla 3. Errores relativos en el número de árboles por hectárea utilizando expansiones basadas en el radio de 5 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE[2]	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	-0,309	0,528	-0,687	0,069	-1,562	0,944	-1,00	0,498
Ps/nat	14	0,106	0,268	-0,049	0,261	-0,493	0,705	-0,399	0,630
Qp	8	-0,144	0,422	-0,497	0,208	-1,203	0,914	-0,732	0,501
Ppi	6	0,205	0,232	-0,038	0,448	-0,438	0,848	-0,106	0,455
Pp/VH	12	0,105	1,024	-0,545	0,755	-2,240	2,450	-1,000	2,333
Pp/VA	30	-0,078	0,843	-0,393	0,236	-1,830	1,674	-1,000	2,047
Pp/H	192	0,456	1,109	0,298	0,614	-1,738	2,649	-1,000	8,332
Qf	7	0,303	0,638	-0,286	0,893	-1,365	1,972	-0,426	1,202
Ps/rep	26	-0,017	0,261	-0,123	0,088	-0,566	0,531	-0,624	0,498
TOTAL	**305**	**0,284**	**0,983**	**0,173**	**0,395**	**-1,655**	**2,222**	**-1,000**	**8,332**

[1] Abreviaturas, no descritas, como en la tabla 2.
[2] FS: Fagus sylvatica, Ps/nat: Parcelas de Pinus sylvestris de origen natural, Qp: Quercus pyrenaica, Ppi: Pinus pinaster, Pp/VH: Parcelas de Pinus pinea en Viana y El Hoyo, Pp/VA: Parcelas de Pinus pinea en Valladolid, Pp/H: Parcelas de Pinus pinea en Huelva, Qf: Quercus faginea, Ps/rep: Parcelas de Pinus sylvestris procedentes de repoblación.
M1 y M2: Intervalo de confianza al 95% para la media. P1 y P2: Intervalo de predicción al 95%.

Tabla 4. Errores relativos en el número de árboles por hectárea utilizando expansiones basadas en el radio de 10 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	-0,063	0,259	-0,248	0,122	-0,677	0,550	-0,537	0,287
Ps/nat	14	-0,008	0,181	-0,113	0,096	-0,412	0,396	-0,407	0,359
Qp	8	0,047	0,416	-0,301	0,395	-0,997	1,092	-0,641	0,769
Ppi	6	0,104	0,068	0,032	0,175	-0,085	0,293	0,005	0,182
Pp/VH	12	-0,088	0,256	-0,251	0,075	-0,675	0,500	-0,583	0,287
Pp/VA	30	0,051	0,430	-0,109	0,212	-0,842	0,944	-1,000	1,101
Pp/H	164	0,419	0,800	0,305	0,533	-1,163	2,001	-1,000	8,332
Qf	7	0,315	0,624	-0,263	0,892	-1,319	1,948	-0,426	1,202
Ps/rep	26	0,019	0,136	-0,036	0,074	-0,266	0,304	-0,251	0,351
TOTAL	**277**	**0,275**	**0,691**	**0,197**	**0,353**	**-1,086**	**1,636**	**-1,000**	**8,332**

[1] Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.

Tabla 5. Errores relativos en el número de árboles por hectárea utilizando expansiones basadas en el radio de 15 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	-0,053	0,208	-0,202	0,096	-0,546	0,440	-0,412	0,216
Ps/nat	8	-0,023	0,193	-0,184	0,139	-0,506	0,461	-0,407	0,262
Qp	8	0,051	0,415	-0,296	0,398	-0,989	1,091	-0,641	0,769
Ppi									
Pp/VH	12	-0,137	0,208	-0,270	-0,005	-0,614	0,339	-0,488	0,144
Pp/VA	30	0,082	0,312	-0,035	0,198	-0,568	0,731	-0,669	1,101
Pp/H	102	0,292	0,621	0,170	0,414	-0,946	1,530	-0,653	4,832
Qf	7	0,315	0,624	-0,263	0,892	-1,319	1,948	-0,426	1,202
Ps/rep									
TOTAL	**177**	**0,184**	**0,535**	**0,104**	**0,263**	**-0,875**	**1,242**	**-0,669**	**4,832**

[1] Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.

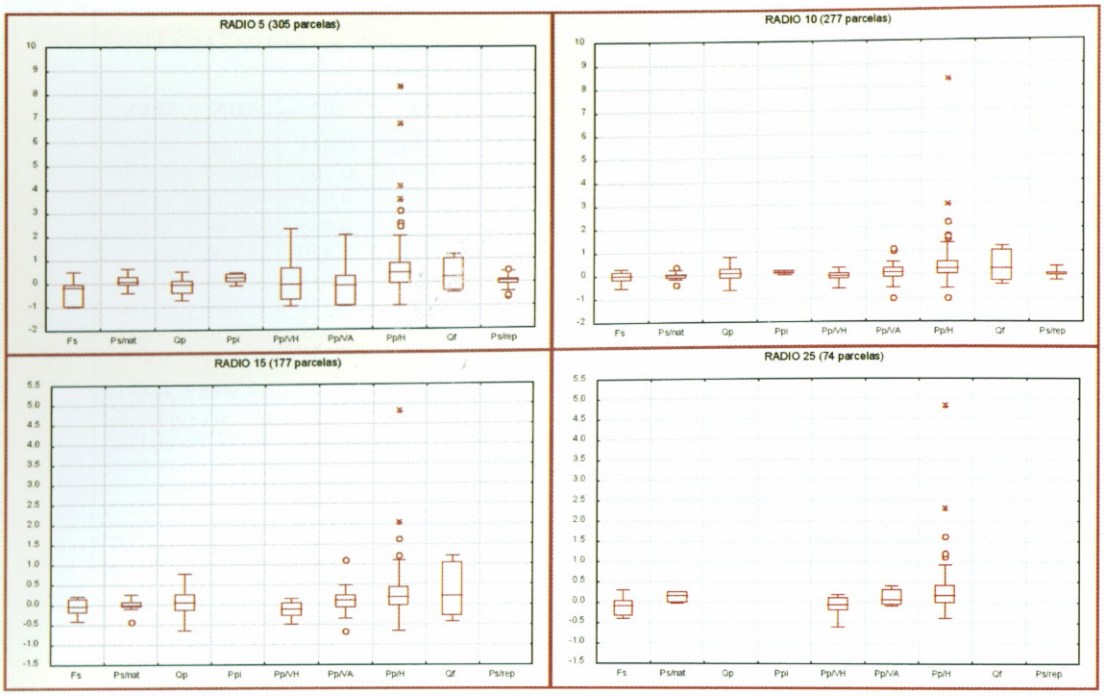

Figura 1. Principales características de los errores relativos de la estimación del número de árboles por hectárea para cada tipo de masa utilizando parcelas reales. Abreviaturas como en la tabla 3

Tabla 6. Errores relativos en el número de árboles por hectárea utilizando expansiones basadas en el radio de 15 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	-0,102	0,250	-0,281	0,076	-0,695	0,490	-0,387	0,301
Ps/nat	2	0,124	0,196	-1,634	1,882	-2,921	3,168	-0,014	0,262
Qp									
Ppi									
Pp/VH	12	-0,084	0,247	-0,241	0,073	-0,650	0,482	-0,602	0,203
Pp/VA	11	0,116	0,204	-0,021	0,253	-0,358	0,591	-0,086	0,415
Pp/H	39	0,431	0,913	0,135	0,727	-1,441	2,303	-0,376	4,832
Qf									
Ps/rep									
TOTAL	**74**	**0,220**	**0,716**	**0,055**	**0,386**	**-1,215**	**1,656**	**-0,602**	**4,832**

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

Tabla 7. Comparación de varianzas de las sucesivas extensiones para el número de árboles por hectárea utilizando las 52 parcelas reales con radio máximo igual a 25 m

COMPARACIÓN	VARIANZA 1	VARIANZA 2	VALOR TEST F	P-VALOR DEL TEST
RADIO 5-RADIO10	2,70364	1,63615	1,65244	0,0703
RADIO 10-RADIO15	1,63615	0,59813	2,72187	0,0004
RADIO 15-RADIO 25	0,59813	0,59668	1,00374	0,9892

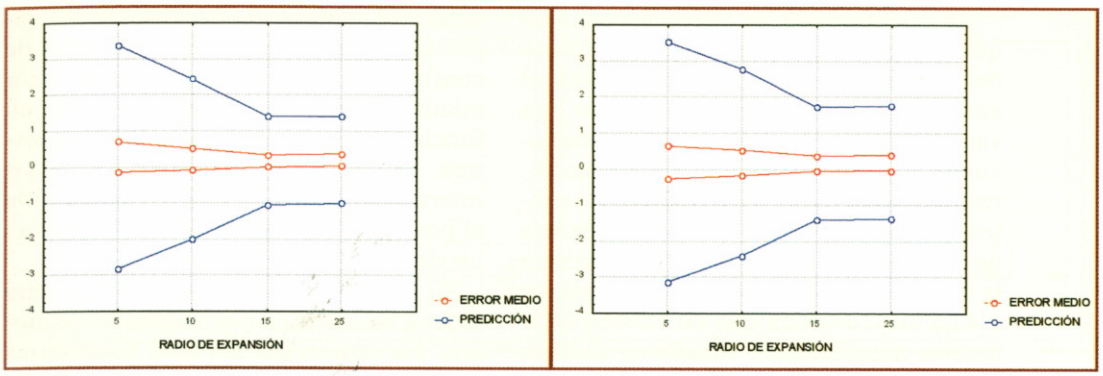

Figura 2. Intervalo de confianza al 95% para el error relativo medio e intervalo de predicción al 95% para el error relativo del número de árboles por hectárea (gráfico de la izquierda) y del área basimétrica (gráfico de la derecha) en función del radio de la parcela (se han utilizado las 52 parcelas reales de radio 25 metros)

Tabla 8. Errores relativos en el área basimétrica utilizando expansiones basadas en el radio de 5 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	-0,167	0,637	-0,623	0,289	-1,679	1,345	-1,000	0,663
Ps/nat	14	0,134	0,342	-0,063	0,332	-0,630	0,899	-0,362	1,048
Qp	8	-0,252	0,440	-0,620	0,116	-1,356	0,852	-0,874	0,337
Ppi	6	0,140	0,178	-0,047	0,328	-0,355	0,636	-0,135	0,355
Pp/VH	12	0,773	1,890	-0,428	1,974	-3,556	5,103	-1,000	4,159
Pp/VA	30	-0,106	0,787	-0,400	0,188	-1,744	1,531	-1,000	1,951
Pp/H	192	0,484	1,050	0,335	0,634	-1,592	2,561	-1,000	6,376
Qf	7	0,333	0,810	-0,416	1,083	-1,786	2,453	-0,507	1,740
Ps/rep	26	-0,045	0,219	-0,134	0,043	-0,504	0,413	-0,509	0,386
TOTAL	**305**	**0,325**	**0,997**	**0,213**	**0,438**	**-1,639**	**2,290**	**-1,000**	**6,376**

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

Tabla 9. Errores relativos en el área basimétrica utilizando expansiones basadas en el radio de 10 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	0,143	0,443	-0,174	0,461	-0,909	1,196	-0,551	1,235
Ps/nat	14	-0,025	0,187	-0,133	0,083	-0,444	0,394	-0,277	0,504
Qp	8	0,010	0,347	-0,280	0,301	-0,861	0,881	-0,752	0,293
Ppi	6	0,055	0,104	-0,054	0,164	-0,234	0,343	-0,063	0,182
Pp/VH	12	0,177	0,733	-0,289	0,643	-1,503	1,857	-0,920	1,669
Pp/VA	30	0,054	0,437	-0,109	0,217	-0,854	0,962	-1,000	1,323
Pp/H	164	0,309	0,695	0,202	0,417	-1,068	1,687	-1,000	6,260
Qf	7	0,371	0,780	-0,350	1,092	-1,669	2,411	-0,507	1,740
Ps/rep	26	-0,013	0,069	-0,041	0,015	-0,158	0,132	-0,160	0,090
TOTAL	**277**	**0,210**	**0,609**	**0,138**	**0,282**	**-0,990**	**1,411**	**-1,000**	**6,260**

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

La eficiencia de las diferentes coronas que componen las parcelas concéntricas del IFN ha sido estudiada mediante el análisis de las diferencias entre las varianzas encontradas entre las estimaciones del número de árboles por hectárea para cada radio. El resultado del análisis de las 52 parcelas con radio máximo igual a 25 metros y algún árbol mayor en la última corona (diámetro normal mayor a 42,5 cm), muestra que no existen diferencias significativas cuando se utilizan parcelas de 25 metros con respecto a las parcelas de 15 metros (Tabla 7). Es decir se puede obviar el último radio cuando se estima el número de árboles por hectárea. La Figura 2 muestra los intervalos de confianza y de predicción para el error relativo del número de árboles por ha en función del radio de la parcela de muestreo. Se observa que la reducción en los intervalos citados es prácticamente nula al pasar de parcelas de radio 15 a parcelas de radio 25 metros.

El análisis anterior se ha repetido para el área basimétrica con resultados análogos. La estimación del área basimétrica es insesgada para casi todos los tipos de masa empleando cualquiera de los radios de las parcelas del IFN (Tablas 8 a 11).

Tabla 10. Errores relativos en el área basimétrica utilizando expansiones basadas en el radio de 15 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	0,049	0,198	-0,092	0,191	-0,420	0,519	-0,358	0,309
Ps/nat	8	-0,060	0,154	-0,188	0,069	-0,445	0,325	-0,277	0,183
Qp	8	0,020	0,347	-0,270	0,310	-0,851	0,891	-0,752	0,293
Ppi									
Pp/VH	12	0,009	0,368	-0,225	0,242	-0,834	0,851	-0,709	0,818
Pp/VA	30	0,108	0,330	-0,015	0,231	-0,577	0,794	-0,644	1,323
Pp/H	102	0,268	0,511	0,167	0,368	-0,752	1,288	-0,719	3,579
Qf	7	0,371	0,780	-0,350	1,092	-1,669	2,411	-0,507	1,740
Ps/rep									
TOTAL	**177**	**0,189**	**0,467**	**0,120**	**0,258**	**-0,736**	**1,114**	**-0,752**	**3,579**

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

Tabla 11. Errores relativos en el área basimétrica utilizando expansiones basadas en el radio de 25 metros de las parcelas reales[1]

ESPECIE	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
Fs	10	-0,027	0,200	-0,171	0,116	-0,503	0,448	-0,422	0,212
Ps/nat	2	0,088	0,135	-1,126	1,301	-2,014	2,189	-0,008	0,183
Qp									
Ppi									
Pp/VH	12	0,113	0,276	-0,062	0,289	-0,520	0,747	-0,213	0,818
Pp/VA	11	0,138	0,202	0,002	0,273	-0,332	0,607	-0,058	0,537
Pp/H	39	0,407	0,736	0,168	0,645	-1,102	1,915	-0,365	3,579
Qf									
Ps/rep									
TOTAL	**74**	**0,252**	**0,578**	**0,118**	**0,386**	**-0,907**	**1,411**	**-0,422**	**3,579**

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

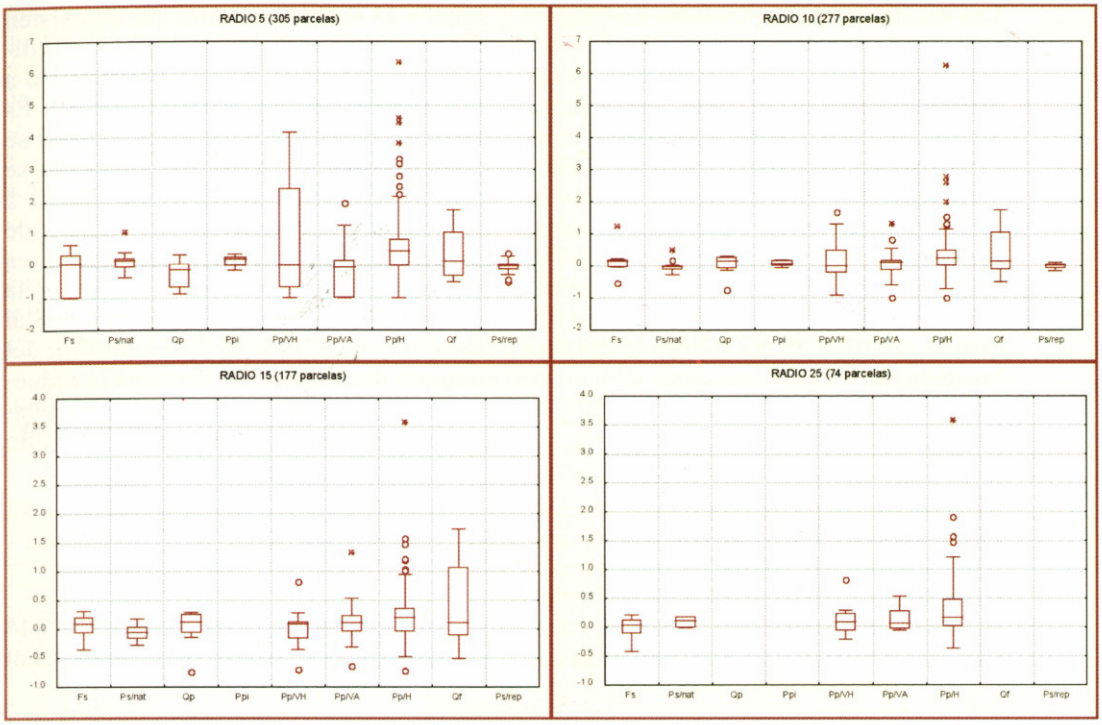

Figura 3. Principales características de los errores relativos de la estimación del área basimétrica para cada tipo de masa utilizando parcelas reales. Abreviaturas como en la tabla 3

Tabla 12. Comparación de varianzas de las sucesivas extensiones para el área basimétrica utilizando las 52 parcelas reales con radio máximo igual a 25 m

COMPARACIÓN	VARIANZA 1	VARIANZA 2	VALOR TEST F	P-VALOR DEL TEST
RADIO 5-RADIO10	2,35045	1,20365	1,95277	0,0163
RADIO 10-RADIO15	1,20365	0,371157	3,24296	0,0000
RADIO 15-RADIO 25	0,371157	0,356924	1,03988	0,8873

Tabla 13. Errores relativos en el número de árboles por hectárea para las parcelas simuladas con distribución espacial de tipo Poisson[1]

RAD. EXP.	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
5 metros	446	-0,0279	0,388	-0,064	0,008	-0,791	0,735	-1,000	1,564
10 metros	446	-0,0011	0,187	-0,018	0,016	-0,368	0,366	-0,579	0,831
15 metros	446	0,0018	0,150	-0,012	0,016	-0,294	0,298	-0,518	0,512
25 metros	446	0,0013	0,150	-0,013	0,015	-0,294	0,297	-0,518	0,512

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

Las masas de pino piñonero en Huelva presentan una estimación del área basimétrica sesgada por arriba; este sesgo puede deberse a la gran variabilidad interna de estas masas. Los errores relativos oscilan alrededor del 10% cuando se utilizan las parcelas de 25 metros de radio, excepto en el caso de las masas onubenses de pino piñonero que se dispara hasta el 37%. En la Figura 3 se pueden observar las características de los errores relativos en la estimación del área basimétrica.

Análogamente al caso del número de árboles por hectárea, la eficiencia de las diferentes coronas que componen las parcelas concéntricas del IFN ha sido estudiada mediante el análisis de las diferencias entre las varianzas encontradas entre las estimaciones del área basimétrica para cada radio. El resultado del análisis de las 52 parcelas con radio máximo igual a 25 metros, muestra que no existen diferencias significativas cuando se utilizan parcelas de 25 metros con respecto a las parcelas de 15 metros (Tabla 12). Es decir, al igual que en el caso anterior se puede obviar el último radio cuando se estima el área basimétrica. La Figura 2 muestra los intervalos de confianza y de predicción para el error relativo del área basimétrica en función del radio de la parcela de muestreo. Se observa que al igual que en el caso de la estimación del número de árboles por hectárea la reducción en los intervalos citados es prácticamente nula al pasar de parcelas de radio 15 a parcelas de radio 25.

Parcelas simuladas

De las 896 parcelas simuladas, 446 corresponden a una distribución espacial

Tabla 14. Errores relativos en el número de árboles por hectárea para las parcelas simuladas con distribución espacial de tipo Regular[1]

RAD. EXP.	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
5 metros	450	-0,0143	0,219	-0,035	0,006	-0,444	0,416	-0,737	0,724
10 metros	450	-0,0008	0,098	-0,010	0,008	-0,193	0,191	-0,375	0,289
15 metros	450	0,0043	0,096	-0,005	0,013	-0,184	0,192	-0,280	0,340
25 metros	450	0,0040	0,095	-0,005	0,013	-0,183	0,191	-0,296	0,340

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

Tabla 15. Comparación de varianzas de las sucesivas expansiones para el número de árboles por hectárea en cada una de las distribuciones espaciales

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	COMPARACIÓN	VARIANZA 1	VARIANZA 2	VALOR TEST F	P-VALOR DEL TEST
POISSON	RADIO 5-RADIO10	0,1503130	0,0348167	4,31728	0,0000
	RADIO 10-RADIO15	0,0348167	0,0226405	1,53780	0,0000
	RADIO 15-RADIO 25	0,0226405	0,0225187	1,00541	0,9546
REGULAR	RADIO 5-RADIO10	0,0477924	0,0095106	5,02515	0,0000
	RADIO 10-RADIO15	0,0095106	0,0091472	1,03973	0,6799
	RADIO 15-RADIO 25	0,0091472	0,0090335	1,01259	0,8946

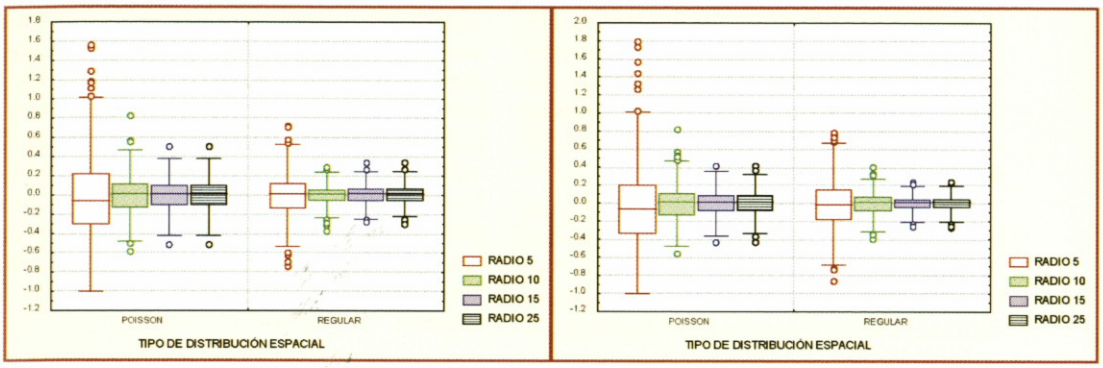

Figura 4. Principales características de los errores relativos de la estimación del número de árboles por hectárea (gráfico de la izquierda) y del área basimétrica (gráfico de la derecha) para cada tipo de parcela simulada (Poisson y regular)

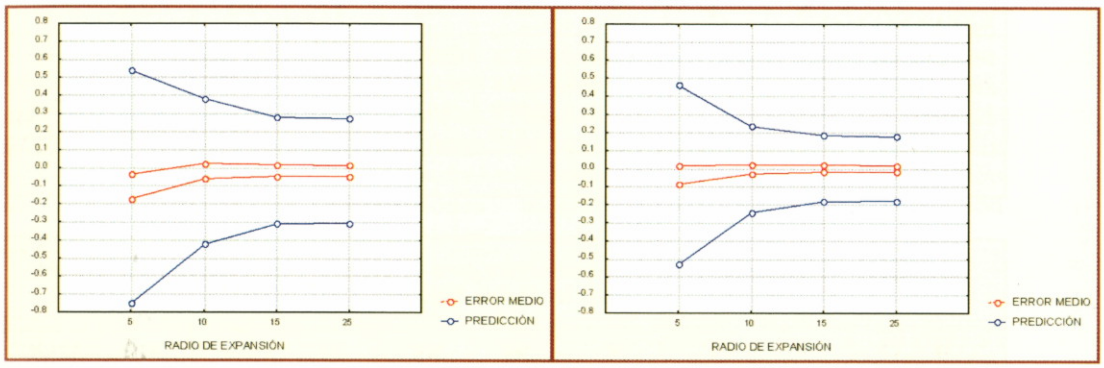

Figura 5. Intervalo de confianza al 95% para el error relativo medio e intervalo de predicción al 95% para el error relativo del número de árboles por hectárea en función del radio de la parcela y del tipo de parcela simulada. A la izquierda aparecen los intervalos para las parcelas de tipo Poisson y a la derecha para las parcelas de tipo regular

tipo Poisson y 450 a una distribución regular. Se observa en las Tablas 13 y 14 que la precisión obtenida en la estimación del número de árboles por hectárea con parcelas del IFN es mayor en las parcelas regulares que en las de tipo Poisson. El incremento en el radio de la parcela hace que aumente la precisión, de modo que las parcelas de 25 m son las más precisas en ambos tipos de parcela. En los dos tipos de distribución y para todos los radios la estimación de esta variable es insesgada. La Figura 4 muestra las características de los errores relativos en la estimación del número de árboles por hectárea para cada tipo de distribución espacial.

Para comparar las sucesivas expansiones de las parcelas se utilizaron tan sólo las parcelas con algún árbol mayor a 42,5 centímetros en alguna de las coronas. Esto se cumple en 179 parcelas de las simuladas. En la Tabla 15 y en la Figura 5 se muestra que para ambas distribuciones espaciales la última corona de la parcela (radio 25 m) no añade una mejora en

la estimación del número de árboles por hectárea. Incluso cuando la distribución espacial es regular con la parcela de radio 10 se obtiene una precisión similar que cuando se emplean las coronas de radio 15 y 25 m.

Del análisis de la estimación del área basimétrica se deduce que en las dos ditribuciones espaciales simuladas las parcelas del tipo de las del IFN produce estimaciones insesgadas del área basimétrica. Este método produce unos intervalos de confianza más pequeños, tanto para la media como para la predicción, en las parcelas regulares (Tablas 16 y 17). La Figura 4 muestra las principales características de los datos analizados. En la Figura 6 y en la Tabla 18, se comprueba que la última corona de las parcelas del IFN (radio 25 m) no aumenta la precisión en la estimación del área basimétrica.

Tabla 16. Errores relativos en el área basimétrica para las parcelas simuladas con distribución espacial de tipo Poisson[1]

RADIO DE EXPANSIÓN	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
5 metros	446	-0,0398	0,415	-0,078	-0,001	-0,855	0,776	-1,000	1,803
10 metros	446	-0,0005	0,189	-0,018	0,017	-0,373	0,372	-0,549	0,826
15 metros	446	0,0032	0,132	-0,009	0,016	-0,257	0,264	-0,432	0,416
25 metros	446	0,0025	0,132	-0,010	0,015	-0,256	0,261	-0,432	0,416

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

Tabla 17. Errores relativos en el área basimétrica para las parcelas simuladas con distribución espacial de tipo Regular[1]

RADIO DE EXPANSIÓN	N	$\bar{X}$	S	M1	M2	P1	P2	MIN.	MAX.
5 metros	450	-0,0212	0,267	-0,046	-0,004	-0,547	0,505	-0,858	0,781
10 metros	450	-0,0071	0,119	-0,018	-0,004	-0,242	0,227	-0,395	0,405
15 metros	450	0,0001	0,084	-0,008	0,008	-0,164	0,165	-0,247	0,242
25 metros	450	0,0002	0,082	-0,008	0,007	-0,161	0,160	-0,270	0,242

[1] *Abreviaturas y símbolos no descritos como en las tablas 2 y 3.*

Tabla 18. Comparación de varianzas de las sucesivas expansiones para el área basimétrica en cada una de las distribuciones espaciales

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	COMPARACIÓN	VARIANZA 1	VARIANZA 2	VALOR TEST F	P-VALOR DEL TEST
POISSON	RADIO 5-RADIO10	0,1717930	0,0357705	4,80265	0,0000
	RADIO 10-RADIO15	0,0357705	0,0175118	2,04265	0,0000
	RADIO 15-RADIO 25	0,0175118	0,0172962	1,01246	0,8961
REGULAR	RADIO 5-RADIO10	0,0715442	0,0142063	5,03609	0,0000
	RADIO 10-RADIO15	0,0142063	0,0069857	2,03362	0,0000
	RADIO 15-RADIO 25	0,0069857	0,0066704	1,04727	0,6248

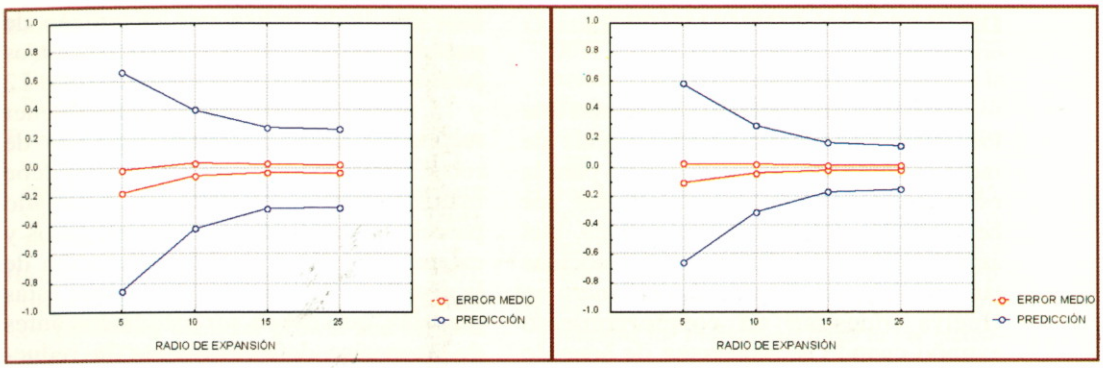

Figura 6. Intervalo de confianza al 95% para el error relativo medio e intervalo de predicción al 95% para el error relativo del área basimétrica en función del radio de la parcela y del tipo de parcela simulada. A la izquierda aparecen los intervalos para las parcelas de tipo Poisson y a la derecha para las parcelas de tipo regular

La comparación entre los resultados obtenidos para cada tipo de distribución con cada uno de los diferentes radios (Tablas 19 y 20), muestra que existen diferencias en la eficiencia de las parcelas en función de las distribuciones espaciales estudiadas. En las parcelas regulares el método IFN es más eficiente que las parcelas con distribución de los árboles al azar (Poisson). La varianza de los errores es unas dos veces y media mayor en el caso de distribución al azar (Poisson) que en la distribución regular.

Tabla 19. Comparación de varianzas de las distribuciones espaciales para el número de árboles por hectárea en cada una de las expansiones

RADIO DE EXPANSIÓN	COMPARACIÓN	VARIANZA 1	VARIANZA 2	VALOR TEST F	P-VALOR DEL TEST
RADIO 5	POISSON-REGULAR	0,1503130	0,0477924	3,14513	0,0000
RADIO 10	POISSON-REGULAR	0,0348167	0,0095106	3,66081	0,0000
RADIO 15	POISSON-REGULAR	0,0226405	0,0091472	2,47512	0,0000
RADIO 25	POISSON-REGULAR	0,0225187	0,0090335	2,49280	0,0000

Tabla 20. Comparación de varianzas de las distribuciones espaciales para el área basimétrica por hectárea en cada una de las expansiones

RADIO DE EXPANSIÓN	COMPARACIÓN	VARIANZA 1	VARIANZA 2	VALOR TEST F	P-VALOR DEL TEST
RADIO 5	POISSON-REGULAR	0,1717930	0,0715442	2,40122	0,0000
RADIO 10	POISSON-REGULAR	0,0357705	0,0142063	2,51793	0,0000
RADIO 15	POISSON-REGULAR	0,0175118	0,0069857	2,50680	0,0000
RADIO 25	POISSON-REGULAR	0,0172962	0,0066704	2,59298	0,0000

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que los muestreos que utilizan parcelas de radio variable son adecuados tanto para la estimación del número de árboles por hectárea como del área basimétrica. Del amplio rango de situaciones estudiadas tan sólo las parcelas de pino piñonero en Huelva muestran un comportamiento extraño cuando se muestrean de acuerdo con la metodología del IFN. Esto puede deberse a las variadas condiciones ecológicas de este tipo de masas. En este conjunto de datos están mezclados los pinares de *Pinus pinea* de la zona costera onubense con las repoblaciones de la Sierra de Aracena, por lo que los pobres resultados obtenidos hubiesen podido mejorarse con una adecuada estratificación. En las parcelas simuladas, la desviación típica de los errores relativos del número de árboles por hectárea es de un 9,5% en las parcelas regulares y de un 15% en las de tipo Poisson. Por otra parte en el caso del área basimétrica la desviación típica de los errores relativos es del 8,2% en las parcelas regulares y del 13,2% en las parcelas aleatorias o de tipo Poisson. Se observa, por tanto, que la estimación es mejor las parcelas regulares que en las aleatorias y que se estima con más precisión el área basimétrica que el número de árboles por hectárea.

Como ya se comentó en la introducción las parcelas concéntricas de radio variable tienen una amplia utilización en la gestión e investigación forestal en bosques muy diversos incluyendo bosques boreales, templados, mediterráenos y subtropicales. En el caso de los bosques estudiados, la comparación de las varianzas para los diferentes radios, muestra que posiblemente se pueda disminuir el radio de las parcelas del IFN hasta 15 metros sin perder eficiencia estadística. Este resultado indica que el tamaño de parcela que se está utilizando en otros países europeos (radios máximo entre 12 y 15 metros) es suficiente para obtener resultados aceptables para variables de rodal. Sin embargo, esta afirmación debe matizarse ya que no se han estudiado parcelas con distribución de agregados y existen aspectos, como la estimación de la distribución diamétrica mediante estas parcelas, que deben ser estudiados antes de aconsejar definitivamente la reducción del tamaño de las parcelas del IFN. Además, debe considerarse que en ambiente mediterráneo existen masas muy poco densas en las que posiblemente los resultados obtenidos deban aplicarse con cautela.

Por tanto se puede concluir del estudio de los factores de expansión que: (1) el diseño de parcelas de radio variable es adecuado para estimar el número de árboles por hectárea y el área basimétrica en una amplia variedad de masas forestales, y (2) el tamaño de las parcelas del IFN se puede reducir a 15 metros de radio sin perder eficiencia en la estimación del número de árboles por hectárea y del área basimétrica en masas con una distribución espacial de los árboles regular y aleatoria. Conviene resaltar que antes de tomar una medida de este tipo (reducción del tamaño de la parcela) deben ampliarse estos estudios puesto que el valor de la base de datos generada hasta el momento podría verse disminuido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENOS, C. 2001. La saisie des donnés in situ à l'IFN: enjeux et perspectives. *Revue Forestière Fançaise* **3-4**, 257-261.

BRAVO-OVIEDO, A.; DELGADO, J.A. 2002. Discriminant análisis of timber volume with TM images and forest attributes in Nothern Spain. *International Journal of Remote Sensing* (en revision).

BRAVO, F. 1999. *Modelo de producción para Pinus sylvestris L. en el Alto Valle del Ebro.* Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, Palencia.

BRAVO, F.; MONTERO, G. 2001. Site index estiamtion in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the High Ebro Basin (northern Spain) using soil attributes. *Forestry* **74**(4), 395-406.

BRAVO, F.; HANN, D.W.; MAGUIRE, D.A. 2001. Impact of competitor species composition on predicting diameter growth and survival rates of Douglas-fir trees in southwestern Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* **31**, 2237-2247.

CANTERO, A.; ESPINEL, S.; SÁENZ, D. 1995. Un modelo de gestión para las masas de *Pinus radiata* en el País Vasco. *Cuadernos de la SECF* **1**, 193-198.

CAÑADAS, N. 2000. *Pinus pinea L en el Sistema Central (Valles del Tiétar y del Alberche): desarrollo de un modelo de crecimiento y producción de piña.* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

CONDÉS, S.; MARTÍNEZ-MILLÁN, J. 1997. Caracterización de las distribuciones diamétricas de masas monoespecíficas, aplicación a los hayedos navarros. *Lib I Congreso Forestal Hispano-Luso IRATI'97*, Pamplona. Mesa temática 4, pp. 179-184.

CONDÉS, S.; MARTÍNEZ-MILLÁN, J. 2001. Optimización del tamaño de la parcela de muestreo mediante simulación del inventario forestal. *III Congreso Forestal Español,* Granada. Tomo 4, pp. 21-27.

DOMÍNGUEZ, M.; DEL RÍO, M.; BRAVO, F. 2001. Caracterización selvícola de las repoblaciones de *Pinus sylvestris* L. en los páramos del norte de Castilla y León. *III Congreso Forestal Español,* Granada. Tomo 5, pp. 710-715.

DRAPIER, J.; CLUZEAU, C. 2001. La base de données écologiques de l'IFN. *Revue Forestière Française* **3-4**, 365-371.

GORDILLO, E.; DÍAZ, R.; MARTÍNEZ-MILLÁN, J. 1999. Elementos estructurales para la caracterización de la biodiversidad en el Tercer Inventario Forestal Nacional. *Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes,* Santiago de Compostela. II, pp. 641-649.

GORDILLO, E.; DÍAZ, R.; MARTÍNEZ-MILLÁN, J. 2001. Biodiversidad en el Tercer Inventario Forestal Nacional: Primeros resultados de la valoración por medio de indicadores. *III Congreso Forestal Español,* Granada. Tomo 7, pp. 21-27.

HANN, D.W.; HESTER, A.S.; OLSEN, C.L. 1995. *ORGANON user's manual: Edition 5.0.* Department of Forest Resources, Oregon State University, Corvallis, Oregon. 127 pp.

HANN, D.W.; WANG, C.H. 1990. *Mortality equations for individuals trees in the mixed-conifer zone of southwest Oregon.* Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Oreg. Res. Bull. 67.

IBÁÑEZ ULARGUI, I. 1989. *El haya (Fagus sylvatica L.) en La Rioja. Selvicultura y ordenación.* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

MONSERUD, R.A.; STERBA, H. 1999. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *Forest Ecology and Management* **113**, 109-123.

PRIETO, C.; DOMÍNGUEZ, M.; BRAVO, F. 2001. Caracterización de las masas de *Pinus sylvestris* Arn. subsp. *Salzmannii* (Dunal) Franco en el Sistema Ibérico Español. *III Congreso Forestal Español*, Granada. Tomo 1, pp. 510-515.

RONDEUX, J.; LECOMTE, H. 2001. L'inventaire forestier wallon. *Revue Forestière Française* **3-4**, 263-267.

SCHREUDER, H.T.; GREGOIRE, T.G.; WOOD, G. B. 1993. *Sampling methods for multiresource forest inventory.* Wiley and Sons Inc., New York 446 pp.

STIERLIN, H.R.; BRÄNDI, U-B; HEROLD, A.; ZINGGELEN, J. 1994. *Schweizerisches Landesforstinventar anleitung für die Felaufnahmen 1993-1995.* Birmensdorf, E.F. für W.S. und L., 204 pp.

TOKOLA, T.; SHRESTHA, S.M. 1999. Comparison of cluster-sampling techniques for forest inventory in southern Nepal. *Forest Ecology and Management* **116**, 219-231.

ZUMRAWI, A.A.; HANN, D.W. 1993. *Diameter growth equations for Douglas-fir and grand fir in western Willamette Valley of Oregon.* Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Oreg. Res. Contrib. 4.