

Fernández López, M., Rodríguez-Pérez, J.R., Castedo Dorado, F. y Sanz Ablanado, E. (2010): Evaluación de errores en el posicionamiento con receptores GPS de doble frecuencia bajo cubierta arbolada de *Pinus Radiata* D.Don. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 72-85. ISBN: 978-84-472-1294-1

EVALUACIÓN DE ERRORES EN EL POSICIONAMIENTO CON RECEPTORES GPS DE DOBLE FRECUENCIA BAJO CUBIERTA ARBOLADA DE *PINUS RADIATA* D. DON

Mercedes Fernández López¹, José Ramón Rodríguez-Pérez², Fernando Castedo Dorado³, Enoc Sanz Ablanado⁴

(1) Universidad de León. ESTIA. Avenida de Astorga, s/n. 24400. Ponferrada (León). magform@hotmail.com

(2) Universidad de León. Grupo de Investigación GEOINCA. Avenida de Astorga, s/n. 24400-Ponferrada-León. jr.rodriquez@unileon.es

(3) Universidad de León. Grupo de Investigación GEOINCA. Avenida de Astorga, s/n. 24400-Ponferrada-León. fcasd@unileon.es

(4) Universidad de León. Grupo de Investigación GEOINCA. Avenida de Astorga, s/n. 24400-Ponferrada-León. esana@unileon.es

RESUMEN

El uso de receptores GPS en el ámbito forestal se ha generalizando y sus aplicaciones son muy variadas (localización de parcelas de inventario, guiado de maquinaria forestal, uso recreativo, etc.). El objetivo de este trabajo fue evaluar la precisión y exactitud del posicionamiento GPS bajo la cubierta de masas de *Pinus radiata*. Para ello se identificaron 12 puntos de muestreo en parcelas con 4 densidades diferentes (3 parcelas en cada nivel de densidad) y 1 punto en una zona despejada para poder comparar la influencia de la cobertura arbórea. En cada punto se hicieron observaciones estáticas por un período de una hora. Se determinaron las coordenadas X,Y,Z para cada segundo, se calcularon las exactitudes y se identificaron las distribuciones teóricas que mejor se ajustaban a los valores de exactitud obtenidos para cada tipo de masa. Del análisis de los resultados se pudo deducir que: i) las variables dasométricas que más influyen en la exactitud planimétrica son el número de pies por ha (N) y el diámetro medio cuadrático (d_g); ii) la probabilidad de que la exactitud planimétrica sea menor de 1 m y de que la exactitud altimétrica sea menor de 3 m es del 70%. Los resultados obtenidos permitirán planificar más adecuadamente las observaciones con receptores GPS en zonas arboladas.

Palabras Clave: GPS, GNSS, cobertura arbolada, *Pinus radiata*

ABSTRACT

*The use of GPS receivers in forestry has been widespread and this technology is used for location of inventory plots, guided forest machinery, recreational use and navigation, etc. The aim objective of this study was to evaluate the accuracy and positioning accuracy of dual-frequency GPS receivers under tree canopy of *Pinus radiata* stands. In order to compare the influence of tree canopy in the GPS positioning, 12 points were established in 4 stands with different densities (three plots of each density level). An additional point was located in a nearby area without trees. At each point, static observations were made for a period of one hour and the coordinates X,Y,Z were calculated for each second. Precisions, accuracies and theoretical distributions were identified for each type of stands. The stand variables related to horizontal accuracy were the number of trees per hectare (N), the Hart-Becking index (IH) and the quadratic mean diameter (d_g). The probability that both the horizontal accuracy is less than 1 m and the vertical accuracy is less than 3 m is 70%. The results obtained will allow a more adequately planning of observations with GPS receivers in forest areas.*

Key Words: GPS, GNSS, forest canopy, *Pinus radiata*.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Introducción

El sistema de posicionamiento por satélite GPS (Global Positioning System) permite calcular las coordenadas precisas de un punto sobre la superficie terrestre a partir de señales transmitidas por una constelación de satélites artificiales. El GPS es una tecnología de uso común para hacer levantamientos topográficos para proyectos de ingeniería, catastro, creación y actualización de cartografía, navegación, seguimiento de flotas, etc. Son también muy numerosas las aplicaciones ambientales y forestales. Existen trabajos científicos sobre receptores GPS para navegación en áreas naturales (Mancebo and Chamberlain, 2000), caracterización de vías forestales (Martin et al., 2001), localización de árboles o parcelas de inventario y cálculo de áreas y perímetros (Tachiki et al., 2005), control y seguimiento de maquinaria forestal (McDonald and Carter, 2002; Cordero et al., 2006; Kopka and Reinhardt, 2006), etc. Además, el GPS es una herramienta básica para el desarrollo de los denominados sistemas precisos de producción forestal (*precision forestry*), que consisten en la identificación y segregación de zonas homogéneas de gestión forestal para aplicar tratamientos diferenciados con el objetivo de incrementar la cantidad y la calidad de la madera, aumentar los beneficios y mantener la calidad ambiental (Taylor et al., 2006).

Los receptores GPS más modernos, trabajando en zonas sin árboles y en modo diferencial (DGPS), permiten medir las coordenadas de un punto con una exactitud de unos pocos milímetros. En las aplicaciones forestales, los requerimientos de precisión y exactitud en el posicionamiento GPS dependen del tipo de aplicación. Para la delimitación de grandes zonas forestales y creación de cartografía a pequeña escala, es suficiente con conseguir una precisión de unos pocos metros. Sin embargo, si es necesario localizar árboles individuales se requieren precisiones de pocos decímetros o incluso centímetros. Por tanto, cada tipo de aplicación requiere la utilización del receptor y sistema de posicionamiento GPS adecuado.

Antecedentes

La precisión y exactitud del posicionamiento GPS en zonas forestales son peores que las logradas en zonas despejadas. Este bajo rendimiento se debe a la topografía, generalmente accidentada, de las zonas forestales y a que los árboles obstaculizan la correcta recepción de la señal de los satélites, e incluso impidiéndola. La cubierta forestal afecta a la precisión y a la exactitud debido a la atenuación de la señal (Yoshimura and Hasegawa 2003) y a la pérdida temporal del ciclo-reloj que se transmite en la señal GPS (Hasegawa and Yoshimura, 2007).

Los receptores monofrecuencia (código fase) trabajando en posicionamiento absoluto (un sólo receptor) o DGPS (dos receptores), trabajando en zonas forestales alcanzan precisiones que varían entre los 10 y 2 metros; para las aplicaciones de sistemas precisos de producción forestal o guiado de maquinaria forestal, es necesario utilizar receptores de doble frecuencia trabajando en DGPS que pueden lograr precisiones por debajo de 0,5 m.

Los trabajos de investigación para estudiar estos efectos se han centrado fundamentalmente en la identificación de las características de la masa forestal que más condicionan la precisión, la modelización de los errores provocados por la cobertura forestal y la comparación entre equipos y modos de medición. Así, Sawaguchi et al. (2003), evidenciaron que el tipo de bosque y las alturas de las antenas condicionan la precisión en modo diferencial. El área basimétrica es una de las variables dasométricas que condiciona la precisión del posicionamiento basado en código o en la diferencia de fase de las señales GPS (Næsset 2001; Næsset and Jonmeister, 2002). Yoshimura and Hasegawa (2003) consiguieron relacionar la estructura de masas forestales con los valores de precisión y exactitud de las coordenadas GPS.

Otros trabajos se han centrado en la modelización de los errores utilizando la regresión logística para evaluar la probabilidad de resolución de ambigüedades en el posicionamiento DGPS (Næsset et al., 2000; Hasegawa and Yoshimura, 2003; 2007). También se han aplicado simulaciones Monte Carlo para estimar la relación entre la señal recibida y la estructura del bosque (Sawaguchi et al., 2005).

Existen también trabajos en los que se comparan precisiones y exactitudes obtenidas por diferentes tipos de receptor GNSS (Mancebo and Chamberlain, 2000; Rodríguez-Pérez et al., 2007) o por diferentes tipos de posicionamiento (Næsset and Jonmeister, 2002; Gegout and Piedallu, 2005). Otros investigadores se han centrado en comparar el sistema GPS con otros sistemas similares como el GLONASS (Næsset 2000; Næsset et al., 2001).

El pino radiata en El Bierzo

La comarca de El Bierzo está situada en el noroeste de la provincia de León y abarca una extensión de unas 311.800 hectáreas. El relieve comarcal está formado por una hoya tectónica a la que derivan todos los valles de los numerosos afluentes del río Sil. La cota más alta de la corona montañosa que la rodea la alcanza el Catoute, con 2144 metros de altitud y las tierras más bajas, por debajo de los 400 metros, corresponden a las riberas del Sil. Este complejo territorio, climáticamente a caballo entre la España seca y la lluviosa, presenta una gran diversidad biológica y una importante potencialidad forestal.

Las plantaciones de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) en Castilla y León han ido aumentando progresivamente en los últimos años. Actualmente existen más de 15.000 hectáreas en esta Comunidad Autónoma, localizadas fundamentalmente en la comarca de El Bierzo. El crecimiento de la especie se ve favorecido por la exposición solana y altitudes inferiores a 800 m. Las plantaciones se localizan en su mayor parte en parcelas privadas, de pequeña extensión y motivadas por el interés de la industria de la madera existente en El Bierzo. Actualmente existen todavía muchas parcelas que reúnen las condiciones adecuadas en la comarca para la especie pudiéndose aumentar la superficie ocupada por la misma en un futuro hasta unas 30.000 hectáreas (8 % de la superficie comarcal) (Fernández-Manso y Sarmiento, 2004).

Si se aumenta la superficie ocupada, se aplica un modelo selvícola dirigido a la obtención de madera de calidad para sierra y chapa, y se promueve el asociacionismo entre los propietarios, los resultados serían social y económicamente muy positivos, pudiendo llegar a existir un importante sector forestal vinculado a la especie en la comarca. Las inversiones directas llegarían, sólo para esta especie, a los 1.000 millones anuales para la ejecución de trabajos de plantación y mejora (desbroces, clareos y podas), lo que permitiría mantener un empleo estable de más de 150 personas. La producción anual esperable de madera sería de 405.000 m³ (175.000 m³ para aserrado, 90.000 m³ para chapa y 140.000 m³ para trituración). Este nivel productivo tan importante y diversificado permitiría suministrar de forma sostenible un importante sector industrial de primera transformación que daría un valor añadido a esta materia prima y generaría más de 300 puestos de trabajo.

Por todo lo indicado en párrafos anteriores, se considera justificada la elección de la especie forestal (*Pinus radiata*) y zona de estudio (El Bierzo).

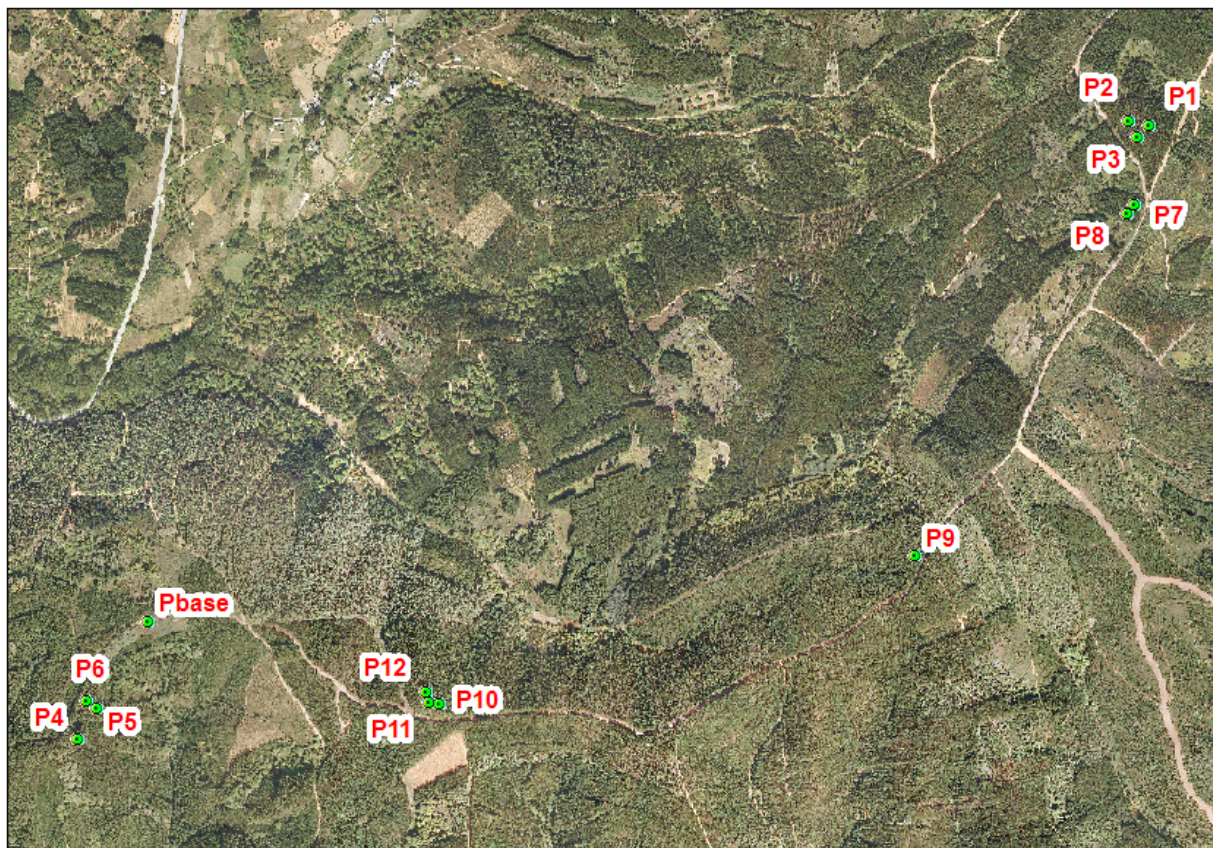


Figura 11. Localización de las parcelas y de la BASE.

Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el municipio de Sancedo, situado en el centro de El Bierzo. Sancedo tiene unas 750 hectáreas de pino radiata, siendo el municipio berciano con mayor superficie forestal, motivo por el cual se ha llevado a cabo el estudio en este lugar.

En un monte de esta localidad se han señalado 12 parcelas de pino radiata y una base en una zona despeja; los trece puntos están situados en la cercanía de un camino forestal. En la Figura 1 se muestra la localización de las doce parcelas y del punto situado en la zona sin obstáculos para la recepción de las señales GPS (BASE).

Objetivos

Como se ha expuesto en los apartados anteriores, para evaluar la calidad de las observaciones GPS bajo cubierta arbolada, es necesario identificar las características de la masa forestal (altura de los árboles, altura de copa, densidad de plantación, volumen de madera, etc.) que más condicionan la precisión y exactitud en el posicionamiento. Por lo tanto, el objetivo fundamental de este trabajo ha consistido en evaluar la precisión y exactitud de las coordenadas GPS bajo cobertura arbolada de *Pinus radiata*. También se pretende identificar las características dasométricas que más condicionan los errores de las observaciones GPS así como estimar la probabilidad de lograr determinadas exactitudes en función de parámetros dasométricos.

METODOLOGÍA

El trabajo se ha desarrollado en dos etapas. En la primera etapa se localizaron las parcelas, se tomaron los datos de inventario forestal, se marcó un punto en una zona despejada (BASE) y se tomaron las coordenadas GPS de los puntos donde se localizaron las parcelas dentro de la masa arbolada. En la segunda etapa se caracterizaron las masas y se postprocesaron los datos GPS, se calcularon las exactitudes y se trataron estadísticamente.

Trabajo de campo

Las doce parcelas arboladas se marcaron en masas homogéneas y representativas de la especie en la zona. En cada masa se marcó un punto con un hito y se delimitaron las parcelas con un radio de 10 m. En cada parcela se contabilizó el número de árboles existente (n), se midió el diámetro normal de todos los árboles (d_i), la altura de los cuatro árboles más gruesos de cada parcela (la media de los cuales se consideró la altura dominante de la parcela, H_0), la altura de los seis árboles de diámetro inmediatamente inferior al de los dominantes (cuyo valor medio se consideró la altura media de la parcela, h_m) y la altura de la copa (h_{copa}) en los seis árboles antes comentados. El número de pies/ha (N) se calculó extrapolando el número de pies por parcela a la hectárea.

Para la medición de las coordenadas de cada punto se hicieron posicionamientos estáticos con dos receptores GPS trabajando de forma simultánea. El protocolo de toma de datos GPS en cada parcela fue el siguiente: se colocó un receptor GPS Topcon Hiper+ en el centro de la parcela y otro en la BASE, se grabaron las posiciones durante una hora con un intervalo de grabación de un segundo y una máscara de elevación de 10°.

Procesado de los datos

A partir de los datos del inventario forestal se calcularon las siguientes variables de masa: diámetro medio cuadrático (d_g), índice de Hart-Becking (IH) y biomasa aérea total (W).

El diámetro medio cuadrático (d_g , cm) representa el diámetro del árbol con el área basimétrica (G) media, calculándose ésta a partir de los diámetros de cada árbol de la parcela (d_i):

$$d_g = \sqrt{\frac{4G}{\pi n}}, \text{ siendo } G = \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} d_i^2$$

El índice de Hart-Becking (IH) se define como la relación entre el espaciamiento medio entre árboles (a) y la altura dominante (H_0) de la masa. Para una disposición de los árboles en malla cuadrada, su expresión viene dada por:

$$IH(\%) = \frac{a}{H_0} 100 = \frac{100}{H_0 \sqrt{N}} 100$$

Para estimar la biomasa aérea (w) se ha utilizado el modelo desarrollado por Balboa et al. (2006), quienes diferenciaron los siguientes componentes de la misma: madera (w_m), corteza (w_c), ramas gruesas (w_{rg}), ramas finas (w_{rf}), ramillos (w_{ram}) y acículas (w_{ac}):

$$w = (w_m + w_c + w_{rg} + w_{rf} + w_{ram} + w_{ac}) = \sum_{i=1}^n \left(0.0123 d_i^{1.6042} h_i^{1.4131} + 0.0036 d_i^{1.26564} + (1.37699 + 0.001065 d_i^2 h_i) + 0.0363 d_i^{2.6091} h_i^{-0.9417} + 0.0078 d_i^{1.9606} + 0.0423 d_i^{1.7141} \right)$$

donde d_i es el diámetro normal de cada árbol (cm), h_i es su altura total (m), n es el número de árboles existentes en cada parcela y w es la biomasa total aérea de la parcela (kg). Los valores obtenidos por parcela se extrapolaron posteriormente a la hectárea (w , kg ha⁻¹).

El cálculo de la posición precisa de la BASE se llevó a cabo mediante corrección diferencial GPS con los datos de la estación de Ponferrada (PONF), que pertenece a la Red GNSS de Castilla y León (<http://gnss.itacyl.es/>). Las coordenadas precisas (*reales*) del centro de cada parcela también se calcularon por corrección diferencial GPS con la información grabada en el punto BASE.

Para facilitar la interpretación de los resultados las coordenadas observadas con el GPS (longitud, latitud y altu-

ra elipsoidal) se proyectaron usando el Datum WGS-84 en proyección UTM (Huso 29N). Para las altitudes se mantuvieron las alturas elipsoidales.

Con las coordenadas precisas obtenidas se calcularon las exactitudes y las precisiones en el centro de cada parcela y se relacionaron con las variables dasométricas que caracterizan dichas parcelas.

La exactitud de cada medida se calculó por la diferencia entre las coordenadas precisas del centro de cada parcela (las calculadas en el postproceso de las observaciones) y las coordenadas medidas en el momento de la toma de datos en campo. Para evitar problemas de signos, se trabajó con valores absolutos. Las expresiones para el cálculo de estas exactitudes son las siguientes:

$$\text{Exactitud en la dirección Este-Oeste: } Exac. X = |X_i - X_{real}|$$

$$\text{Exactitud en la dirección Norte-Sur: } Exac. Y = |Y_i - Y_{real}|$$

$$\text{Exactitud planimétrica: } Exac. XY = \sqrt{(Exac. X)^2 + (Exac. Y)^2}$$

$$\text{Exactitud en sobre el elipsoide WGS-84: } Exac. Z = |Z_i - Z_{real}|$$

Para medir la precisión en cada parcela se ha calculado la desviación estándar de las coordenadas X (σ_x) e Y (σ_y) en intervalos de cinco minutos. Las expresiones para el cálculo de las precisiones planimétricas (XY) y vertical (Z) fueron las siguientes:

$$\text{Precisión planimétrica (XY): } \sigma_H = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

$$\text{Precisión vertical (Z): } \sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{real})^2}{n-1}}$$

Una vez calculadas la exactitud y precisión de cada medida en el centro de cada parcela, se llevó a cabo un análisis estadístico para conocer cómo se distribuyen estos datos, si existen diferencias entre las exactitudes y precisiones para cada parcela y si estas diferencias se pueden relacionar con las características de las masas arboladas. Para este análisis estadístico se utilizó el programa SPSS v15.

Para cada una de ellas se agruparon los datos de exactitudes en dos, tres o cuatro categorías diferentes y se han estudiado todas las posibles combinaciones de dos elementos para determinar si esas dos categorías elegidas proceden o no de poblaciones distintas.

A partir de los datos de inventario se realizaron diversas agrupaciones de las 12 parcelas en función de las cinco variables de masa más diferenciadoras (h_{copa} , N , d_g , IH y w) obteniéndose, para cada variable, dos, tres o cuatro grupos diferentes. Posteriormente se determinó si había diferencias estadísticamente significativas entre los errores calculados para cada grupo/variable usando para ello la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney.

Asimismo, se determinó si los errores calculados en cada grupo se ajustaban a alguna función de distribución. Para ello se llevaron a cabo ajustes de las distribuciones continuas Beta, Generalizada de Valores Extremos, SB de Johnson, Lognormal, Wakeby y Weibull. Para evaluar la bondad de ajuste entre los datos reales y las funciones teóricas se utilizó el test de Kolmogorov-Smirnov para una muestra. Este test permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica y su objetivo es señalar si los datos provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada.

A partir de la función de distribución que presentó los mejores ajustes, se calculó la probabilidad de que el error en el posicionamiento GPS sea igual o inferior a 1m, entre 1 y 3m y superior a 3m para la exactitud planimétrica y la probabilidad de que el error sea inferior a 3m, entre 3 y 7m y superior a 7m para la exactitud altimétrica. De esta manera se puede conocer la probabilidad de obtener una precisión determinada en un posicionamiento con GPS según el tipo de masa de pino existente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las parcelas

A partir de los datos del inventario de cada parcela se calcularon las variables de masa expuestas en el apartado de material y métodos, obteniéndose los siguientes valores (Tabla 1):

Tabla 1. Caracterización dasométrica de las parcelas.

Parcela	h_m (m)	H_o (m)	h_{copa} (m)	N (pies/ha)	d_g (cm)	IH (%)	w (kg/ha)
1	14,483	16,050	9,580	764	17,7	22,54	57717
2	16,417	17,050	10,850	732	20,3	21,68	83696
3	14,860	15,700	9,940	764	20,3	23,04	87207
4	24,583	26,475	17,080	605	28,4	15,36	179483
5	27,400	27,650	19,144	668	29,6	13,99	220913
6	25,550	25,925	16,550	509	28,1	17,10	146441
7	15,917	15,000	9,120	2037	15,2	14,77	114335
8	18,500	18,950	10,100	1751	17,0	12,61	131151
9	15,150	15,275	9,810	1814	15,1	15,37	91907
10	21,783	21,950	11,490	3056	15,8	8,24	216048
11	20,550	22,050	11,790	2960	15,1	8,34	188170
12	22,480	22,280	12,060	2992	14,0	8,21	157546

A partir de las variables dasométricas de la Tabla 1, se llevó a cabo la agrupación de las parcelas. El número de grupos segregados según cada variable dasométricas, así como las parcelas dentro de cada grupo se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Agrupación de las parcelas en función de variables dasométricas.

Grupos	h_{copa} (m) (2 grupos)	N (pies/ha) (4 grupos)	d_g (cm) (2 grupos)	IH (%) (3 grupos)	W (kg/ha) (2 grupos)
G1	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12	4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3	1, 2, 3, 7, 8, 9
G2	4, 5, 6	1, 2, 3	7, 8, 9, 10, 11, 12	4, 5, 6, 7, 8, 9	4, 5, 6, 10, 11, 12
G3	-	7, 8, 9	-	10, 11, 12	-
G4	-	10, 11, 12	-	-	-

Exactitud planimétrica y altimétrica de las observaciones

Para cada grupo definido por cada variable se obtuvieron los estadísticos descriptivos media, mediana, varianza, desviación típica, máximo, mínimo y rango para las exactitudes y precisiones. Así, por ejemplo, en la Tabla 3 se muestran los valores de la mediana de la exactitud obtenidos para cada grupo.

Tabla 3. Valores de la mediana de la exactitud para los grupos de parcelas definidos en Tabla 2 (valores en m).

Grupo	h_{copa} (m) (2 grupos)		N (pies/ha) (4 grupos)		d_g (cm) (2 grupos)		IH (%) (3 grupos)		W (kg/ha) (2 grupos)	
	Exac. XY	Exac. Z	Exac. XY	Exac. Z	Exac. XY	Exac. Z	Exac. XY	Exac. Z	Exac. XY	Exac. Z
G1	2,651	5,586	2,311	4,720	2,406	4,819	2,488	4,952	2,721	5,120

G2	2,311	4,720	2,488	4,952	2,775	5,968	2,666	4,956	2,410	5,481
G3	-	-	3,089	5,338	-	-	2,512	6,388	-	-
G4	-	-	2,512	6,388	-	-	-	-	-	-

Las exactitudes planimétricas obtenidas variaron entre los 2,311 m y los 3,089 m; las exactitudes altimétricas fueron peores variando entre 4,720 m y 6,388 m (Tabla 3). Estos resultados son coherentes con los publicados por Yoshimura y Hasegawa (2003) que obtuvieron precisiones horizontales de entre 3,26 y 6,19 m en repoblaciones de pinos. Los valores de exactitud vertical fueron 1,5 veces superiores.

El test no paramétrico U de Mann-Whitney indicó que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los valores de exactitud mostrados en la Tabla 3 para todos los grupos, excepto para la exactitud vertical entre los grupos G1 y G2 (definidos por la variable N). Como cabría esperar, la precisión empeora cuanto mayor es la altura de copa (h_{copa}), mayor es la densidad de las masa (N) y menor es el diámetro medio cuadrático de los árboles (d_g). Como se puede deducir de la expresión expuesta en el apartado de procesamiento de datos, un menor diámetro medio cuadrático suele implicar mayor densidad del arbolado. Los resultados de biomasa son contradictorios puesto que las exactitudes mejoran al aumentar w ; sería necesario corroborar este resultados con más observaciones GPS bajo cubierta arbolada y midiendo los valores de w en esas localizaciones. Por último, las diferencias en exactitud no muestran una relación muy clara con valores de IH .

En la Figura 2 se representan los diagramas de caja para las variables *Exac. XY* y *Exac. Z* calculadas para cada segundo. Con respecto a la exactitud planimétrica (Figura 2, izquierda) en este diagrama se pueden apreciar tres grupos de parcelas: las parcelas 1,4, 6, 9 y 11, que presentan los datos más agrupados (con valores máximos de exactitud de 4 m); las parcelas 2, 3, 5, 8, 10 y 12, que presentan una mayor variabilidad en la exactitud (valores máximos de hasta 8 m) y la parcela 7, que presentó todavía valores más elevados y dispersos que las anteriores. Los valores de la exactitud planimétrica de cada parcela individual son variables y dependen de la duración y hora del día a las que se hizo la observación (por tanto de la posición de los satélite) y de las características de la masa arbolada.

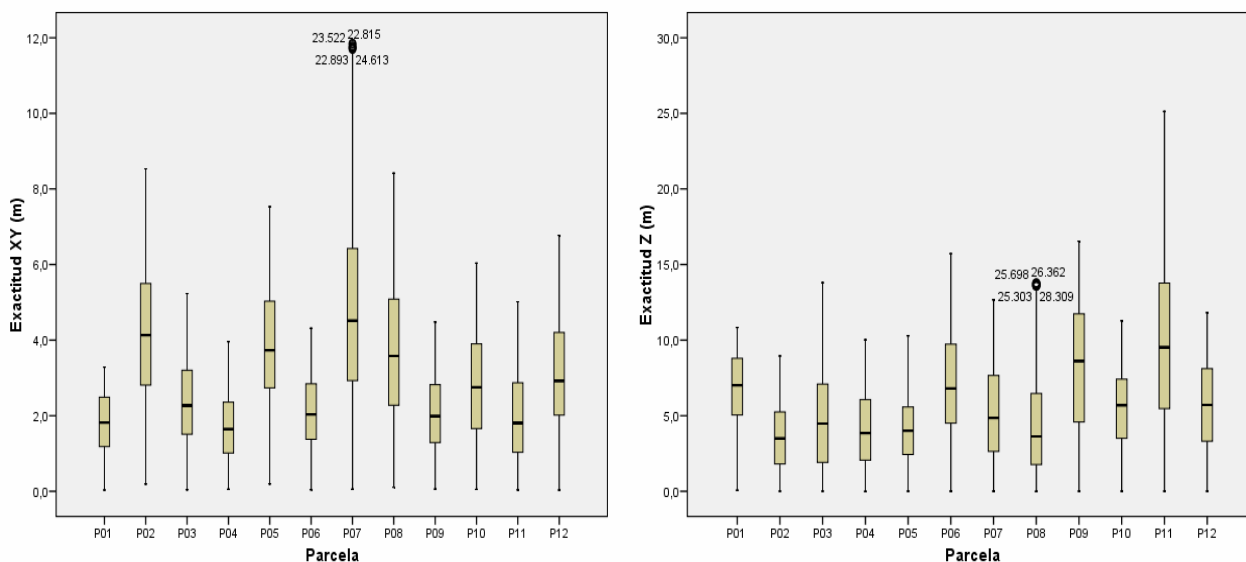


Figura 12. Diagramas de caja para las exactitudes XY (izquierda) y Z (derecha) en el centro de cada parcela.

Como se esperaba, la exactitud vertical es inferior a la planimétrica para todas las parcelas (Figura 2, derecha). La parcela 8 fue la única que presentó valores fuera de rango (*outliers*), mientras que las parcelas 2 y 5 son las que presentaron los datos más agrupados, llegando a alcanzar valores próximos a 10 m. En este caso tampoco se aprecia relación entre la exactitud vertical y las variables dasométricas estudiadas.

Para la BASE también se hicieron diagramas de caja de ambos tipos de exactitud, agrupando los valores por el

día de observación. Los valores de exactitud planimétrica (Figura 3, izquierda) y altimétrica (Figura 3, derecha) son inferiores y mucho más estables que los obtenidos en el interior de las parcelas, mostrando la clara interferencia de la vegetación en el posicionamiento GPS. Durante los días 20, 21 y 22, la mediana de la exactitud planimétrica se situó en torno a 1 m y el día 23 aumentó hasta 1,3 muy inferiores a los que se obtuvieron en las parcelas, donde variaron desde 1,8 m hasta 4,5 m.

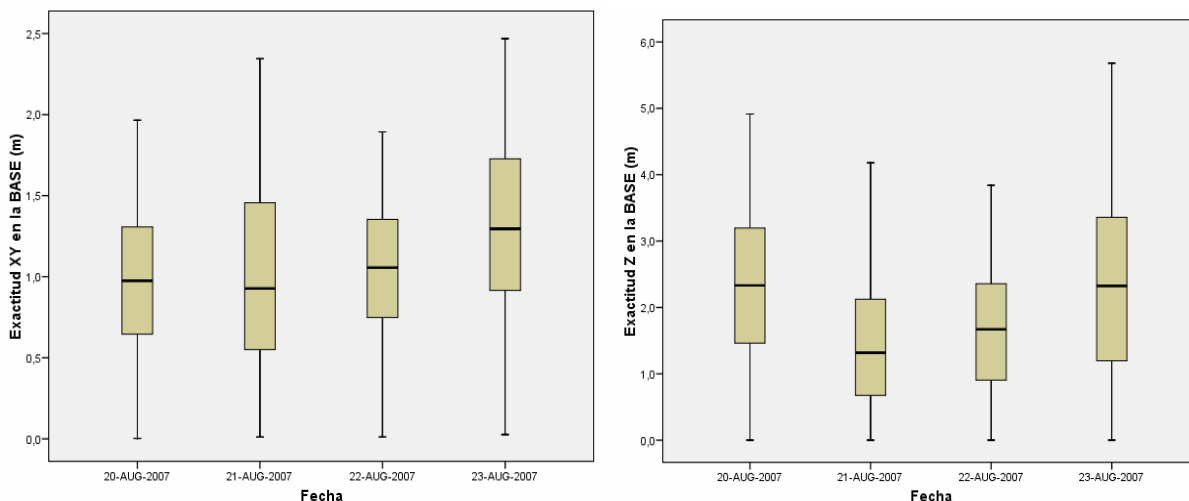


Figura 13. Diagramas de caja para las exactitudes XY (izquierda) y Z (derecha) en la BASE.

Para la exactitud vertical (Figura 3, derecha) la mediana más pequeña se obtuvo el día 21 (1,3 m) y la más grande los días 20 y 23 (2,3 m). Las peores exactitudes verticales variaron entre los 3,8 m del día 22 y los 5,7 m del día 23, valores bastante más elevados de lo esperado y que indica que durante los días y tiempos de observación el número de satélites y geometría de la constelación fue bastante variable. En el interior de las parcelas la mediana de las exactitudes varió entre 3,4 y 9,5 m (Figura 2, derecha), valores bastante superiores a los de la BASE (Figura 3, derecha).

Variación de la precisión en función del tiempo de observación

Uno de los aspectos que más condiciona la precisión de las observaciones GPS es el tiempo de observación: la precisión aumenta con el tiempo de observación. Para mostrar la influencia del tiempo de observación se calcularon las precisiones de las exactitudes acumuladas para 5, 10, 15, 20, ...,60 minutos de tiempo de observación. En la Figura 4 se muestran la exactitud horizontal (izquierda) y vertical (derecha) agrupando las parcelas en función del número de pies por hectárea (*N*); también se representan los valores de la BASE para observar las diferencias con y sin cobertura arbórea.

En las 12 parcelas el valor de la precisión horizontal aumenta con el tiempo de observación y se estabiliza a partir de un tiempo determinado (Figura 4, izquierda). En el caso de los grupo G1 y G4 el valor se estabiliza en torno a 1,5 metros a partir de los 50 minutos, el grupo G3 se estabiliza en 1,65 m a partir de los 30 minutos y el grupo G3 se estabiliza a partir de los 45 minutos en un valor de 2,25 m. En la BASE la precisión se estabiliza en 0,5 metros a partir de los 15 minutos de observación. En la precisión vertical (Figura 4, derecha) también se observó la misma tendencia a la estabilización a medida que se aumenta el tiempo de observación. En los grupos G1 y G2 apenas se aprecian diferencias y se estabilizan en los 3 m a partir de los 45 minutos, el grupo G3 alcanza los 4 m a partir de los 30 minutos y el grupo G4 se estabiliza en los 4,5 m a partir de los 40 minutos de observación. La BASE sólo necesita 10 minutos de observación para obtener una precisión vertical inferior a 1 m.

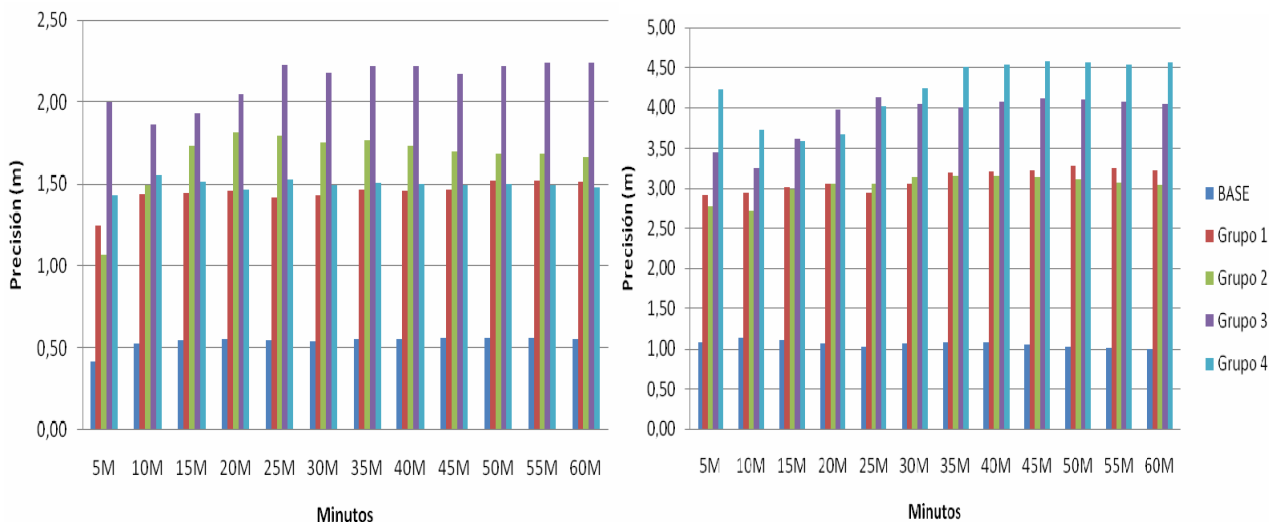


Figura 14. Precisión planimétrica (izquierda) y altimétrica (derecha) en función del tiempo de observación.

En la Figura 4 queda patente que las observaciones GPS bajo cubierta arbolada requieren un mayor período de observación para alcanzar una precisión fijada. Otros autores (ej., Sawaguchi et al., 2005) midieron bajo cubierta de coníferas con una precisión de 4,99 m, trabajando con receptores GPS en modo diferencial y estimaron que para mejorar esta precisión es necesario alargar el tiempo de observación más de 20 minutos.

Por otra parte, los datos de exactitud planimétrica y altimétrica se fraccionaron en intervalos de 5 minutos, agrupando los valores de las parcelas pertenecientes al mismo grupo y determinando la precisión planimétrica y altimétrica. La Figura 5 muestra los valores de la precisión planimétrica (izquierda) y altimétrica (derecha) para los diferentes intervalos de 5 minutos, apreciándose claramente que la hora del día a la que se hace la observación tiene influencia en la precisión.

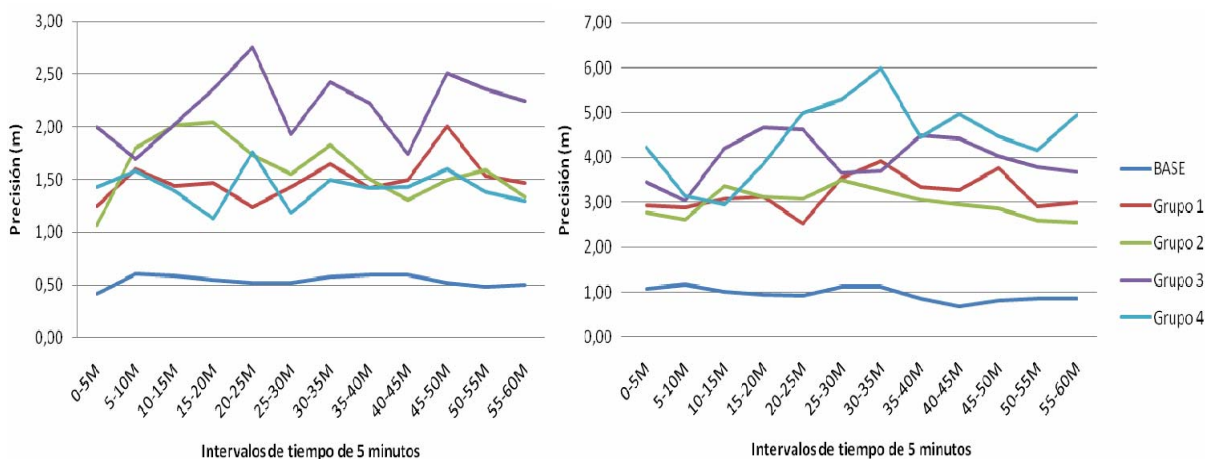


Figura 15. Precisiones horizontal (izquierda) y vertical (derecha) para intervalos de 5 minutos

Asimismo, se observa que la precisión horizontal y la vertical obtenidas para la BASE fueron mucho mejores que las de los cuatro grupos de parcelas (Figura 5, izquierda). Se aprecia una tendencia a empeorar a medida que aumenta N , salvo el grupo G4 que no sigue esta tendencia (es necesario corroborar este resultado con más pruebas de campo). En este trabajo, las mejores precisiones horizontales se obtuvieron en los grupos G1 y G4 que son los grupos con menor y mayor número de pies por ha respectivamente. En el grupo G3 es donde se obtuvieron las peores precisiones horizontales. Los valores son del mismo rango que lo publicados en el trabajo de Yoshimura y Hasegawa

(2003), quienes estimaron en sus mediciones bajo cubierta arbolada una precisión horizontal en el rango 2,16 - 6,79 m (en posicionamiento autónomo).

La precisión horizontal en la zona despejada es uniforme y se encuentra en torno a los 0,5 m, mientras que en las zonas bajo arbolado ésta varió entre 1 y 2,5 m. Por tanto, se puede deducir que la cobertura arbórea influye en la precisión horizontal disminuyéndola entre 0,5 y 1,5 m cuando el intervalo de grabación es de 5 minutos. Sawaguchi et al. (2005) estimaron que más del 60% de la pérdida de señal se debe a la interferencia del árbol y al ángulo de elevación del satélite.

La precisión vertical (Figura 5, derecha) es peor que la horizontal. En la BASE se encuentra en torno a 1 m y bajo cubierta varió entre 2,5 y 6 m. Entre los grupos G1 y G2 casi no se observan diferencias, pero en general la precisión vertical empeora a medida que aumenta el valor de *N*.

Ajustes de la exactitud a funciones de distribución para las estimaciones de probabilidad

La distribución real de las exactitudes calculadas y agrupadas según las variables dasométricas ya comentadas fue ajustada a las 6 funciones de distribución mencionadas en el apartado metodológico. En la Tabla 4 se resumen los resultados indicando qué función de distribución teórica se ajustó mejor a los datos de exactitud horizontal y vertical.

Tabla 4. Mejor función de distribución para las exactitudes horizontales y verticales para cada variable y grupo.

Grupo	<i>h_{copa}</i> (m) (2 grupos)		<i>N</i> (pies/ha) (4 grupos)		<i>d_g</i> (cm) (2 grupos)		<i>IH</i> (%) (3 grupos)		<i>w</i> (kg/ha) (2 grupos)	
	<i>Exa XY</i>	<i>Exa Z</i>	<i>Exa XY</i>	<i>Exa Z</i>	<i>Exa XY</i>	<i>Exa Z</i>	<i>Exa XY</i>	<i>Exa Z</i>	<i>Exa XY</i>	<i>Exa Z</i>
G1	Wakeby	Wakeby	Lognormal	Wakeby	Lognormal	Wakeby	Lognormal	Wakeby	Lognormal	Wakeby
G2	Lognormal	Wakeby	Lognormal	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby	Wakeby
G3	-	-	Wakeby	Wakeby	-	-	Wakeby	Wakeby	-	-
G4	-	-	Wakeby	Wakeby	-	-	-	-	-	-

Las funciones que mejor se ajustaron fueron las de Wakeby (para todas las exactitudes verticales) y la Lognormal. El principal problema que presentan estas funciones es que exigen ajustar muchos parámetros: la Wakeby depende de cinco y la Lognormal de tres.

Otros autores (ej. Mancebo y Chamberlain, 2000 y Mancebo, 2004), obtuvieron buenos ajustes para la función la función de distribución de Rayleigh (que es una función de distribución Weibull limitando el parámetro $\beta = 2$), para la exactitud planimétrica y la función Absnormal para la exactitud altimétrica. Esta discrepancia en la función elegida puede deberse a que los tipos de receptores utilizados (monofrecuencia y de código) son muy diferentes a los usados en este trabajo (bifrecuencia y de fase).

A partir de la mejor función de distribución para cada caso, se calcularon las respectivas funciones de densidad que permitieron estimar las probabilidades de obtener una exactitud planimétrica inferior a 1 m, entre 1 y 3 m y superior a 3 m. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Probabilidades de obtener exactitudes planimétricas (XY) comprendidas ente 3 rangos: $P_{XY<1}$ (*Exac. XY* < 1m), $P_{1<XY<3}$ (1m < *Exac. XY* < 3m) y $P_{XY>3}$ (*Exac. XY* > 3m) (valores en %).

	<i>h_{copa}</i> (m) (2 grupos)			<i>N</i> (pies/ha) (4 grupos)			<i>d_g</i> (cm) (2 grupos)			<i>IH</i> (%) (3 grupos)			<i>W</i> (kg/ha) (2 grupos)		
	$P_{XY<1}$	$P_{1<XY<3}$	$P_{XY>3}$	$P_{XY<1}$	$P_{1<XY<3}$	$P_{XY>3}$	$P_{XY<1}$	$P_{1<XY<3}$	$P_{XY>3}$	$P_{XY<1}$	$P_{1<XY<3}$	$P_{XY>3}$	$P_{XY<1}$	$P_{1<XY<3}$	$P_{XY>3}$
G1	12	51	37	14	57	29	13	55	32	11	55	34	10	49	41
G2	14	57	29	11	56	33	12	49	39	11	51	38	15	55	30
G3	-	-	-	9	44	47	-	-	-	15	54	31	-	-	-

	h_{copa} (m) (2 grupos)			N (pies/ha) (4 grupos)			d_g (cm) (2 grupos)			IH (%) (3 grupos)			W (kg/ha) (2 grupos)		
G4	-	-	-	15	54	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Respecto a la exactitud planimétrica, y a partir de los datos de la Tabla 5 se puede afirmar que aproximadamente el 70% de los valores tuvieron una exactitud planimétrica inferior a 3 m.

Esta Tabla 5 tiene gran utilidad práctica puesto que permite estimar la probabilidad de que una observación GPS, hecha bajo una masa de pino radiata con características dasométricas definidas, se encuentre en alguno de los rangos de precisión indicados. Así, por ejemplo, si se hace una observación GPS bajo una masa de pino radiata con un valor de IH de 8,3 (G3) la probabilidad de que la exactitud planimétrica sea inferior a 1 m es del 15% y la probabilidad de que sea menor de 3 m es del 69%.

También se han estimado probabilidades para diferentes rangos de exactitud altimétricos. En la Tabla 6 se recogen las probabilidades de obtener una exactitud altimétrica inferior a 3 m, entre 3 y 7 m y superior a 7 m.

Tabla 6. Probabilidades de obtener exactitudes altimétricas (Z) comprendidas ente tres rangos: $P_{Z<3}$ (Exac. $Z < 3m$), $P_{3<Z<7}$ ($3m < Exac. Z < 7m$) y $P_{Z>7}$ (Exac. $Z > 7m$) (valores en %).

	h_{copa} (m) (2 grupos)			N (pies/ha) (4 grupos)			d_g (cm) (2 grupos)			IH (%) (3 grupos)			W (kg/ha) (2 grupos)		
	$P_{XY<3}$	$P_{3<XY<7}$	$P_{XY>7}$	$P_{XY<3}$	$P_{3<XY<7}$	$P_{XY>7}$	$P_{XY<3}$	$P_{3<XY<7}$	$P_{XY>7}$	$P_{XY<3}$	$P_{3<XY<7}$	$P_{XY>7}$	$P_{XY<3}$	$P_{3<XY<7}$	$P_{XY>7}$
G1	26	38	36	29	45	26	29	44	27	29	42	29	29	38	33
G2	29	45	26	29	42	29	25	36	39	30	39	31	24	42	34
G3	-	-	-	30	33	37	-	-	-	19	40	41	-	-	-
G4	-	-	-	19	40	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A partir de esta tabla se puede deducir, por ejemplo, que en las parcelas menos densas (grupos definidos por N) la probabilidad de obtener una exactitud inferior a 7 m estuvo en torno al 70% y en las más densas esta probabilidad fue del 60%.

CONCLUSIONES

Se midieron las posiciones GPS bajo 12 parcelas de pino radiata y en un punto situado en una zona despejada próxima. En las parcelas se llevó a cabo un inventario dasométrico que permitió agrupar las parcelas en función de sus características dasométricas. Asimismo se calcularon las exactitudes y precisiones horizontales y verticales de los puntos de muestreo.

Se estudió la variación de la precisión en la determinación de la posición en función del tiempo de observación, deduciéndose que la cobertura arbolada empeora las precisiones y exige aumentar los tiempos de observación para lograr una precisión objetivo. En la mayoría de las parcelas, la precisión horizontal se estabiliza entre los 30 y los 50 minutos y la precisión vertical entre los 30 y los 45 minutos. La precisión vertical ha sido entre dos y tres veces peor que la horizontal.

Las variables dasométricas que más afectan a la exactitud planimétrica son el número de pies por ha (N) y el diámetro medio cuadrático (d_g). En general, a medida que aumenta la densidad de la masa, los valores de las exactitudes disminuyen, mientras que mayores valores de diámetro medio cuadrático (que indican masas adultas con baja espesura) se corresponden mayores valores de exactitud.

Los valores de exactitud planimétrica y altimétrica fueron ajustados a funciones de distribución. La distribución teórica que mejor se ajustó a los datos reales de exactitud fue la función de Wakeby. La probabilidad de que la exactitud planimétrica sea menor de 1 m y de que la exactitud altimétrica sea menor de 3 m se situó en torno al 70%, en los dos casos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balboa M, Rodríguez-Soalleiro R, Merino A, y Álvarez-González J.G. (2006): Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural regimes. *Forest Ecology and Management* 237: 29-38.
- Cordero, R; Mardones, O. y Marticorena, M.. (2006): Evaluation of forestry machinery performance in harvesting operations using GPS technology. In: Ackerman PA, Längin DW & Antonides MC (Editors) 2006: *Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium, Stellenbosch University, South Africa, March 2006*. Stellenbosch University, Stellenbosch. ISBN: 0-7972-1121-7. pp: 163-173.
- Fernández, A. y Sarmiento, A. (2004): *El pino radiata. Manual de Gestión Forestal Sostenible*. Junta de Castilla y León, 62 pp.
- Gegout, J.C. y Piedallu C. (2005): Effects of Forest Environment and Survey Protocol on GPS Accuracy. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 71 (9):1071-1078
- Hasegawa, H. y Yoshimura, T. (2003): Application of dual-frequency GPS receivers to static surveying under tree canopies. *Journal of Forest Research*, 8:103-110.
- Hasegawa, H. y Yoshimura, T. (2007): Estimation of GPS positional accuracy under different forest conditions using signal interruption probability. *Journal of Forest Research*, 12:1-7.
- Kopka, A. y Reinhardt, B. (2006): Accuracy of SIG/GIS applied harvester skidding tracks In: Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests. In: Ackerman PA, Längin DW & Antonides MC (Editors) 2006: *Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium, Stellenbosch University, South Africa, March 2006*. Stellenbosch University, Stellenbosch. ISBN: 0-7972-1121-7. pp149-162.
- Mancebo, S. (2004): *Análisis de precisión y eficiencia de receptores GPS bajo cobertura arbórea*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Superior y Técnica de Ingeniería de Montes.
- Mancebo, S. y Chamberlain, K. (2000): Performance testing of the Garmin eTrex, Garmin GPSIII plus, Magellan GPS 2000XL, and Magellan Blazer Recreation Type Global Positioning System Receivers, URL: http://www.fs.fed.us/database/gps/mtdc/gps2000/Nav_3-2001.htm, USDA Forest Service, Pacific Northwest Region and MTDC Receiver Reports (last date accessed: 5 February 2010).
- Martin, A.A.; Holden, N.M., Owende, P.M. y Ward, S.M. (2001): The effects of peripheral canopy on DGPS performance on forest roads. *International Journal of Forest Engineering*, 12(1): 71-79.
- McDonald, T.P. y Carter, E.A. (2002): Using the global positioning system to map disturbance patterns of forest harvesting machinery. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2): 310-319.
- Næsset, E.; Bjerke, T., Øvstedal, O. y Ryan, L.H. (2000): Contributions of differential GPS and GLONASS observations to point accuracy under forest canopies. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66:403-407.

- Næsset, E. (2001): Effects of differential Single- and dual frequency GPS and GLONASS observations on point accuracy under forest canopies. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67:1021–1026.
- Næsset, E. y Jonmeister, T (2002): Assessing point accuracy of DGPS under forest canopy before data acquisition, in the field and after postprocessing. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17:351–358.
- Rodríguez-Pérez, J.R.; Álvarez, M.F. y Sanz-Ablanedo, E. (2007): Assessment of Low-Cost GPS Receiver Accuracy and Precision in Forest Environments. *Journal of Surveying Engineering*, 133: 159-167.
- Sawaguchi, I.; Nishida K.; Shishiuch, M. y Tatsukawa, S. (2003): Positioning precision and sampling number of DGPS under forest canopies. *Journal of Forest Research*, 8:133–137.
- Sawaguchi, I.; Saitoh, Y. y Tatsukawa, S. (2005): A study of the effects of stems and canopies on the signal to noise ratio of GPS signals. *Journal of Forest Research*, 10:395–401.
- Tachiki, Y.; Yoshimura, T.; Hasegawa, H.; Mita, T.; Sakai, T. y Nakamura, F. (2005): Effects of polyline simplification of dynamic GPS data under forest canopy on area and perimeter estimations. *Journal of Forest Research*, 10: 419-427.
- Taylor, S.E.; McDonald, T.P.; Fulton, J.P.; Shaw, J.N.; Corley, F.W. y Brodbeck, C.J. (2006): Precision forestry in the Southeast U.S. *Proceedings of First International Precision Forestry Symposium, Seattle, WA. June 2001*. University of Washington, Seattle, pp. 397-414.
- Yoshimura, T. y Hasegawa, H. (2003): Comparing the precision and accuracy of GPS positioning in forested areas. *Journal of Forest Research*, 8:147–152.