

CARTOGRAFÍA DE LA BIOMASA AÉREA TOTAL EN MASAS DE *PINUS RADIATA* D. DON MEDIANTE ANÁLISIS MULTIVARIANTE A PARTIR DE DATOS PÚBLICOS LiDAR (PNOA) E IFN 4

Irati Lekuona-Zuazo¹, Antonio L Montealegre-Gracia², María Teresa Lamelas-Gracia^{2,3}

¹ Universidad de Zaragoza, Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. irati.lekuona@gmail.com

² Universidad de Zaragoza, Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, Grupo GEOFOREST-IUCA, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. monteale@unizar.es; tlamelas@unizar.es

³ Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090, Zaragoza, España. tlamelas@unizar.es

RESUMEN

La estimación de la biomasa total aérea (en adelante biomasa) es fundamental para conocer la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas forestales, así como para su evaluación como recurso energético. El objetivo principal de este trabajo ha sido estimar y cartografiar la biomasa de las masas de *Pinus radiata* D. Don de la comarca Arratia-Nerbioi (Bizkaia). Para ello se han utilizado los datos de teledetección LiDAR (*Light Detection And Ranging*) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), así como los datos de campo del Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4). La biomasa fue calculada en 51 parcelas de campo del IFN4 aplicando la ecuación alométrica de Montero *et al.* (2005). Para convertir los valores de biomasa de la parcela a valores por hectárea, se utilizaron los factores de expansión para cada rango diamétrico de tronco que establece el IFN4. Mediante un análisis de correlación entre estos valores de biomasa y las variables independientes extraídas de las nubes de puntos LiDAR, se seleccionó el radio óptimo de 25 m. Finalmente, un análisis multivariante de regresión lineal permitió generar un modelo predictivo de la biomasa. Este modelo fue validado mediante la técnica de validación cruzada dejando un dato fuera y se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,67. Mediante un análisis de correlación entre los valores de biomasa de las parcelas y los valores predichos por el modelo aplicando dos tamaños de pixel, se determinó como resolución más precisa para la cartografía final un tamaño de pixel de 45 m.

Palabras clave: Biomasa; regresión lineal múltiple; *Pinus radiata* D. Don; LiDAR-PNOA; IFN4.

ABSTRACT

The estimation of total aboveground biomass (hereinafter referred as biomass) is required to understand the structure and dynamics of forest ecosystems, as well as for their evaluation as a resource. The main objective of this study is to estimate and map the biomass of *Pinus radiata* D. Don forest stands located in the Arratia-Nerbioi region (Bizkaia). To perform this, LiDAR (Light Detection And Ranging) remote sensing data from the National Plan for Aerial Orthophotography and the information obtained by the Fourth National Forest Inventory (IFN4) have been used. The biomass was calculated in 51 IFN4 field plots applying the allometric equation from Montero *et al.* (2005). Expansion factors for each diameter range established by the IFN4 were used to estimate the biomass values per hectare. Using a correlation analysis between the biomass values and the independent variables extracted from the LiDAR point cloud, an optimal radius of 25 m was selected. Finally, a multivariate linear regression analysis allowed the generation of a biomass predictive model, which was validated using the leave one-out cross-validation technique. The coefficient of determination of the model was 0.67. A correlation analysis between the values of biomass at plot-level and the values predicted by different pixel sizes, allowed the selection of a proper resolution of 45 m.

Keywords: Biomass; multivariate linear regression; *Pinus radiata* D. Don; LiDAR-PNOA; IFN4.

1. INTRODUCCIÓN

El *Pinus radiata* es una especie de crecimiento rápido con turno de 30-35 años y originaria de la costa pacífica de Norteamérica. Ha sido introducida con fines productivos en Chile, Nueva Zelanda, Australia y Sudáfrica, principalmente, así como en España, donde 263.271 ha están dedicadas a esta especie, de las cuales, el 48 % se encuentran en el País Vasco (MAGRAMA, 2015).

Dichas plantaciones, que se introdujeron a finales del siglo XIX, respondieron durante años a la demanda de la industria maderera vasca, alcanzándose precios muy atractivos. Sin embargo, en la última década el ritmo de explotación y el precio de la madera han descendido. En este contexto, y como alternativa a la crisis que atraviesa el sector de la madera, las amplias superficies de *Pinus radiata* existentes en el País Vasco, la mayoría en estado extra maduro, podrían aprovecharse con fines energéticos. La biomasa es una fuente energética renovable, y además se puede traducir en cantidad de carbono retenido por la vegetación y en dióxido de carbono (CO₂) emitido a la atmósfera como consecuencia de un fuego forestal (Montero *et al.*, 2005; Vermote *et al.*, 2009), por lo que su estudio y caracterización es relevante en la lucha contra el calentamiento global.

La biomasa se define como el peso de materia orgánica que existe en un ecosistema forestal por encima y por debajo de la superficie del suelo, y normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea de peso verde o seco, o a través de valores modulares por clases diamétricas (Montero *et al.*, 2005).

Los inventarios forestales tradicionales, como el Inventario Forestal Nacional (IFN), con los que se conoce el estado de las masas y la evolución de las superficies forestales, consisten en mediciones manuales por muestreo que tienen un alto coste económico y temporal, por lo que no se realizan con la frecuencia e intensidad necesaria para una correcta gestión forestal (Hazi, 2013). En estos inventarios solo se inventaría entre el 0,5% y 5% de la superficie total, y los datos se deben extrapolar después a valores medios por hectárea (Valbuena, 2014). El IFN se inició a mediados de 1960 y se viene realizando cada diez años, aunque el IFN4 de 2011 en Euskadi, marcó el inicio de la periodicidad quinquenal con la que se realizarán, a partir de entonces, los próximos IFN en las zonas productivas de clima atlántico.

La tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) tiene un alto potencial como alternativa a los inventarios tradicionales, ya que se obtienen datos continuos para grandes áreas y a menor coste económico. El carácter tridimensional de las nubes de puntos LiDAR proporciona información sobre la estructura de la vegetación, pudiéndose derivar unas métricas o variables independientes que presentan altas correlaciones con el conjunto de variables dasométricas del bosque, entre ellas la biomasa (Montealegre *et al.*, 2016).

El objetivo principal del trabajo es establecer un modelo para estimar la biomasa presente en las masas de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi (Bizkaia, País Vasco), a partir de los datos del vuelo LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), de baja densidad de puntos (0,5 puntos/m²) capturados en el año 2012 y los datos del IFN4 del año 2011. Además se analizará cuál es el tamaño de pixel óptimo para elaborar una cartografía de la distribución de la biomasa en el área de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a las plantaciones de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi, situada en Bizkaia (Figura 1), que ocupan el 44 % de la superficie total comarcal (17.700 ha). Según el Mapa Forestal Español a escala 1:25.000 de 2010, el 42 % de las plantaciones se encuentran en estado de fustal, el 23 % en estado de latizal, el 18 % en estado de monte bravo, el 12 % en estado de repoblado y el 5 % son terrenos talados donde no se ha vuelto a plantar. La comarca presenta un clima atlántico oceánico, propicio para el crecimiento del *Pinus radiata* por las abundantes precipitaciones. Las plantaciones se sitúan, por lo general, en laderas por debajo de los 600-700 m de altitud (Figuras 2 y 3).

2.2 Datos LiDAR

Los datos LiDAR fueron capturados entre los meses de julio y agosto de 2012 mediante un sensor de pulsos discretos LMS-Q680 y una densidad de 0,5 puntos/m², en el marco del PNOA. Los datos han sido distribuidos por Eusko Jaurlaritza-Gobierno Vasco en ficheros de formato LAS, de 2 x 2 km, clasificados de forma automática.

Los puntos identificados como suelo fueron utilizados para crear un modelo digital de elevaciones (MDE) con un paso de malla de 1m, para lo cual se empleó el comando “GridSurfaceCreate” del software FUSION. Este MDE fue necesario para normalizar las alturas de la nube de puntos LiDAR. Dichas nubes fueron recortadas utilizando radios de 15 y 25 m a partir de las coordenadas del centroide de parcela que indica el IFN4, y se extrajeron un conjunto de variables independientes relacionadas con la altura y la distribución de los retornos LiDAR, despreciando aquellos pertenecientes al sotobosque (por debajo de 3 m). Para ello se hizo uso de los comandos “ClipData” y “Cloud Metrics” de FUSION. El objetivo de recortar la nube de puntos y extraer las variables para dos tamaños de parcela diferentes, fue analizar el radio con el cual las estadísticas de la nube de puntos se ajustan mejor a los datos de biomasa obtenidos en las parcelas de campo del IFN4.

2.3 Datos de campo

A la hora de realizar un inventario forestal basado en la tecnología LiDAR, es necesario obtener previamente los datos de campo que posteriormente se relacionarán con las métricas de la nube de puntos. Para ello, hay que medir o inventariar *in situ* la altura y el diámetro normal de cada uno de los árboles de la parcela de campo, a partir de los cuales pueden obtenerse variables como la biomasa.

En este estudio, los datos de campo se han obtenido a partir de la selección de 51 parcelas del IFN4 del año 2011, teniendo en cuenta los siguientes requisitos: 1) encontrarse sobre masas homogéneas y de origen artificial, establecidas por plantación y con tratamiento de monte alto; 2) ser coetáneas (al menos el 90 % de los pies tienen la misma edad individual) o regulares (al menos el 90 % pertenecen a la misma clase artificial de edad) y tener más del 80 % de ocupación de *Pinus radiata*; y 3) presentar una distribución espacial uniforme (el estrato arbóreo es continuo en el espacio). También se evaluó el error posicional derivado de las coordenadas del centroide de la parcela, tomadas durante las tareas de elaboración del IFN4. Para conocer este error se buscaron los rejonos de 10 parcelas del IFN4 en masas de *Pinus radiata* de los valles cantábricos de Álava y Bizkaia, y se tomaron en campo sus coordenadas con un GPS diferencial de alta precisión. Tras comprobar que entre las coordenadas del IFN4 y las coordenadas de los centroides de parcela puede existir una diferencia de hasta 9 m, se estableció un margen de error de 10 m, que permitió seleccionar las 51 parcelas de campo del IFN utilizadas en este trabajo.

En las parcelas seleccionadas se calculó la biomasa de cada pie de pino utilizando la ecuación alométrica de Montero *et al.* (2005) (1). La biomasa de cada pie se ponderó por el factor de expansión del IFN que le corresponde por su rango diamétrico. Con la suma de la biomasa de todos los pies de pino ponderados se obtuvo la biomasa en kg/ha.

$$Biomasa (Kg) = CF * e^{-2,61} * Dn^{2,49} \quad (1)$$

Donde CF es el factor de corrección ($CF = e^{SEE^2/2}$); SEE es el error estándar de la estimación; e es el número de Euler y Dn es el diámetro a la altura del pecho en cm.

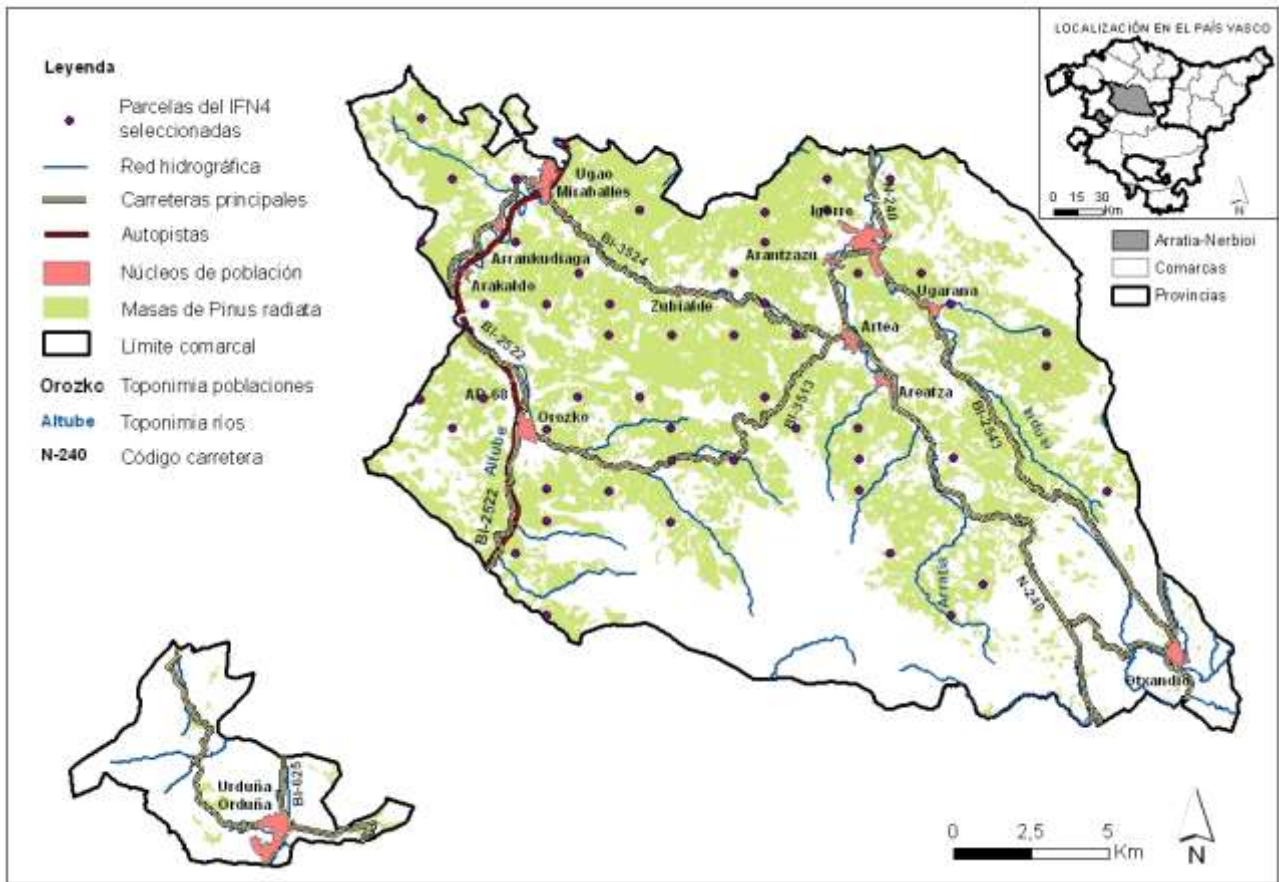


Figura 2. Plantaciones forestales de *Pinus radiata* en Pagomakurre (Areatza). Foto: I. Lekuona.



Figura 3. Interior de una masa de *Pinus radiata* en Urigoiti (Orozko). Foto: I. Lekuona.

2.4 Construcción del modelo de estimación de la biomasa

En primer lugar, se realizó un análisis de correlación de *Spearman* entre los valores de biomasa y las variables LiDAR, empleando parcelas de campo con radios de 15 y 25m (Figura 4). A partir de estas correlaciones se

eligió el radio más adecuado y se llevó a cabo un análisis multivariante de regresión lineal. Para seleccionar el modelo más adecuado, se consideraron el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y la significación estadística. Se comprobó el cumplimiento de las hipótesis básicas de los modelos de regresión lineal y finalmente, al modelo se le aplicó una validación cruzada dejando un dato fuera.

2.5 Representación cartográfica de la biomasa

El modelo final de biomasa se utilizó para generar la cartografía de las masas de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi. Se probaron dos resoluciones de píxel con un tamaño similar a la superficie de las parcelas circulares de campo, siguiendo el método basado en áreas (Gutiérrez *et al.*, 2013). Mediante un análisis de correlación entre la biomasa calculada en cada parcela y la predicha por cada píxel, según su resolución, se determinó cuál era el paso de malla más apropiado para la cartografía final.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La biomasa media calculada en las parcelas fue de 158,08 tn/ha. Las correlaciones entre la biomasa y los estadísticos LiDAR en parcelas de 15 y 25 m de radio resultaron ser muy similares, siendo ligeramente mejores las obtenidas con 25 m, tal como se puede observar en la Tabla 1.

| Variables LiDAR derivadas de los retornos | Parcela IFN de 15m de radio | Parcela IFN de 25 m de radio |
|---|-----------------------------|------------------------------|
| Elev. máxima | 0,82** | 0,80** |
| Elev. media | 0,80** | 0,80** |
| Varianza | 0,70** | 0,73** |
| Asimetría | -0,62** | -0,71** |
| Percentil 40 | 0,80** | 0,80** |
| Percentil 60 | 0,81** | 0,82** |
| Percentil 75 | 0,83** | 0,84** |
| Porcentaje de primeros retornos sobre la altura media | 0,47** | 0,50** |
| Porcentaje de retornos por encima de 3m | 0,36** | 0,39** |

Tabla 1. Coeficientes de correlación de Spearman entre la biomasa y las variables LiDAR en parcelas de 15 y 25m de radio. **: La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

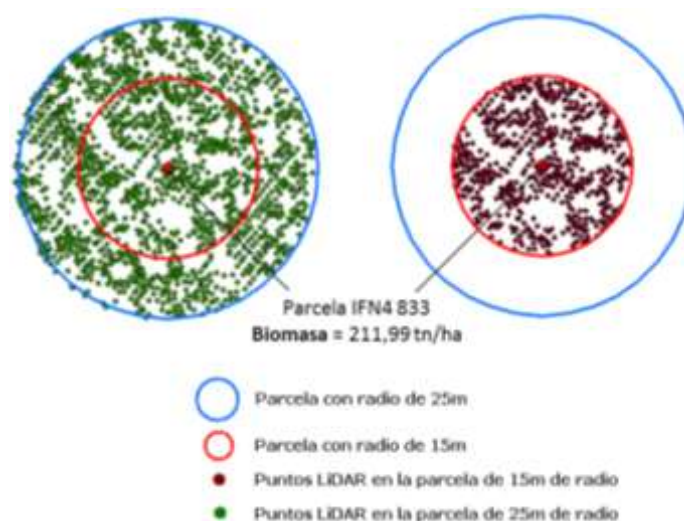


Figura 4. Ejemplo del recorte de la nube de puntos LiDAR para dos radios de parcela diferentes (15 y 25 m).

El modelo de regresión lineal obtenido (2) incluyó dos métricas LiDAR: la elevación máxima y la asimetría de la distribución de las alturas de los retornos. La altura máxima de los puntos tiene una relación directa con la biomasa (la biomasa es mayor en parcelas con pies más altos, en estado de fustal), mientras que la asimetría tiene una relación inversa (los valores más altos de biomasa implican una concentración de puntos en los valores altos de altura). Al modelo se le aplicó una transformación logarítmica inversa, puesto que fue construido con la variable dependiente transformada con objeto de cumplir las hipótesis estadísticas básicas.

$$\text{Biomasa} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{ha}} \right) = 1,063 * 31984,29 * e^{(0,050 * \text{Elev.máxima})} * e^{(-0,370 * \text{Asimetría})} \quad (2)$$

El modelo presenta un R^2 de 0,67 y un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0,34 kg/ha. El sesgo presenta un valor de 0,08.

Teniendo en cuenta que se han utilizado los datos del IFN4, los cuales presentan cierto error posicional y de medida, se considera que el modelo obtenido tiene un buen ajuste. Por ejemplo, González *et al.* (2012) obtuvieron para unas masas de *Pinus radiata* en Galicia un ajuste similar (R^2 de 0,68) en el modelo de estimación de biomasa, en el que también se refleja la relación inversa de la asimetría con la biomasa.

El presente trabajo, que ha resultado ser una aproximación a escala comarcal de la relación entre el IFN4 y los datos del LiDAR-PNOA, podría mejorarse ampliando la zona de estudio y, por consiguiente utilizando más parcelas de campo, pasando de una intensidad de muestreo de 0,05% (con 51 parcelas) a un 10% como sugieren Gutiérrez *et al.* (2013) para la realización de inventarios con LiDAR.

Una vez obtenido el modelo final, se aplicó en dos resoluciones de píxel diferentes: 45 y 50 m de lado. El análisis de correlación entre la biomasa de cada parcela y la predicha para los dos tamaños de píxel (0,81 y 0,75, respectivamente), determinó como más adecuado el píxel de 45 m para realizar la cartografía final (Figura 5).

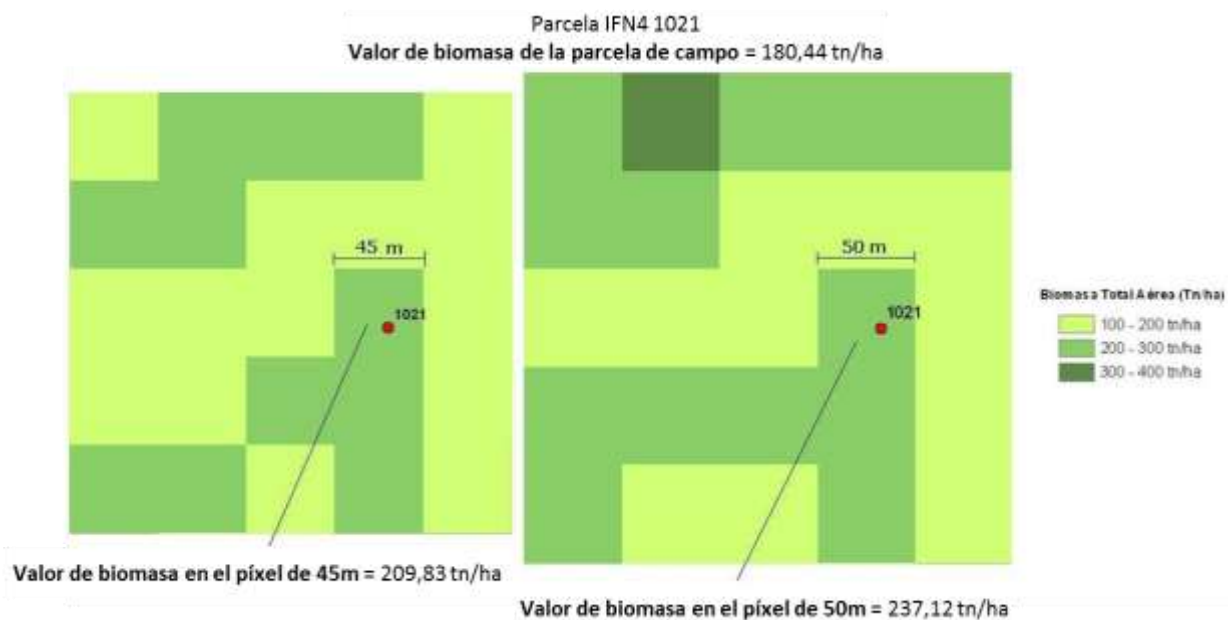


Figura 5. Ejemplo sobre las diferencias en el valor de biomasa estimado para cada resolución (píxel de 45 y 50m). El valor de biomasa de la parcela del IFN4 es el mismo, pero el del píxel sobre el que se sitúa es diferente dependiendo de su tamaño.

Los resultados obtenidos para el conjunto de la comarca Arratia-Nerbioi muestran un valor medio de biomasa de 134,04 tn/ha y un valor máximo de 656,82 tn/ha. Destaca especialmente la zona del valle de Zeberio (Figura 6).

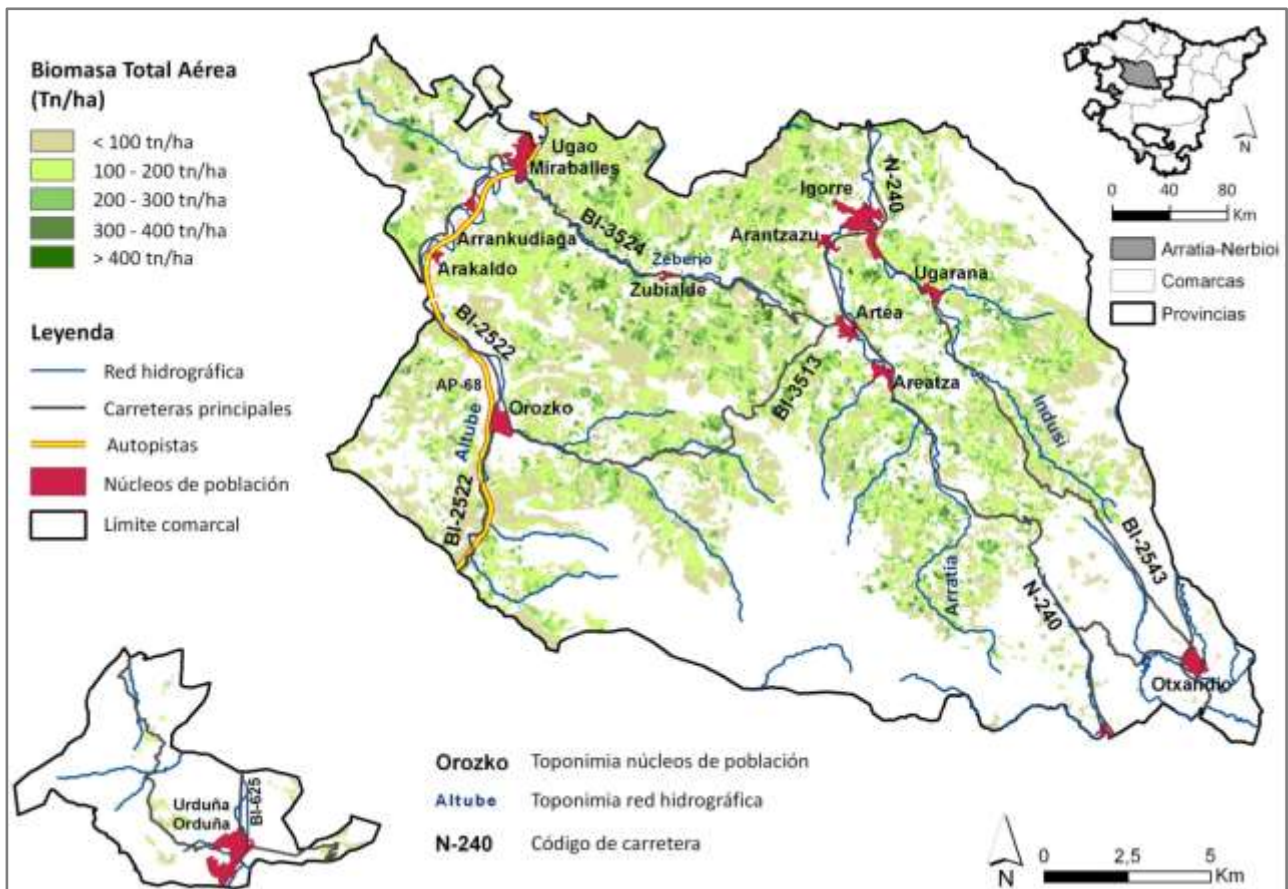


Figura 6. Distribución de la biomasa en la comarca Arratia-Nerbioi (Bizkaia) de acuerdo con el modelo de regresión seleccionado.

4. CONCLUSIONES

Los resultados del trabajo demuestran la utilidad de los datos del IFN4 combinados con los datos LiDAR-PNOA de baja densidad para la construcción de un modelo de estimación de la biomasa. La disponibilidad de datos capturados con esta tecnología LiDAR de manera continua para todo el territorio ha permitido realizar, mediante la aplicación de este modelo, una cartografía de la distribución de la biomasa en las plantaciones forestales de *Pinus radiata* de la zona de estudio. La utilización de los datos del IFN, ya disponibles, podría contribuir a planificar mejor el trabajo de campo y a conocer “desde gabinete” la distribución de la biomasa y otras variables estructurales útiles para la gestión forestal de estas plantaciones, cuya vocación es claramente productiva.

Sería deseable la aplicación de la metodología presentada en este trabajo a zonas más amplias e incluso sobre otras especies forestales. La disponibilidad en los próximos años de nuevas coberturas LiDAR del PNOA y la existencia de inventarios forestales periódicos constituye un aspecto relevante de cara a la gestión del bosque.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Alejandro Cantero de Hazi Fundazioa su apoyo durante el trabajo de campo llevado a cabo para determinar los centros de algunas de las parcelas del IFN4.

6. BIBLIOGRAFÍA

González, E., Diéguez, U., Miranda, D. (2012): “Estimation of stand variables in *Pinus radiata* D. Don plantations using different LiDAR pulse densities”, *Forestry*, 85, 2, pp. 281-292.

Gutiérrez, M., García, D., García, A., Martín, S., Núñez, M.V., González, C., Ayuga, E. (2013): *Reducción del número de parcelas de muestreo al incorporar información auxiliar LiDAR en la estimación de variables dasométricas*. 6º Congreso Forestal Español (6CFE01-482). Sociedad Española de Ciencias Forestales.

Hazi Fundazioa (2013): *Medir el bosque, comprender el paisaje*. Araba, Fundación Hazi Fundazioa.

MAGRAMA (2015): *El Inventario Forestal Nacional. Cincuenta años conociendo el Bosque*. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-forestal-nacional/50_anios_IFN.aspx (último acceso, 23 de mayo de 2016).

Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., García-Martín, A., Escribano, F. (2016): "Use of low point density ALS data to estimate stand-level structural variables in Mediterranean Aleppo pine forest", *Forestry*, 0, pp.1-10.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005): *Producción de Biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. Monografías INIA: Serie Forestal nº13. Madrid. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia.

Valbuena, M. (2014): *Determinación de variables de forestales de masa y de árboles individuales mediante delineación de copas a partir de datos LiDAR aerotransportado. Aplicación a las masas de *Pinus sylvestris* L. en Álava*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de la Rioja.

Vermote, E., Elliot, E., Dubovik, O., Lapyonok, T., Chin, M., Giglio, L., Roberts, GJ. (2009): "An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power", *Journal of Geophysical Research*, 114, D18, pp. 205-227.