

# DETERMINACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN CON IMÁGENES RADAR. ESTUDIO PILOTO EN ÁMBITO DE LA PROVINCIA DE HUELVA. REDIAM

E. Méndez<sup>(2)</sup>, J.J. Vales<sup>(2)</sup>, I. Pino<sup>(2)</sup>, L. Granado<sup>(2)</sup>, G. Montoya<sup>(2)</sup>, R. Prieto<sup>(2)</sup>, I.R. Carpintero<sup>(2)</sup>, F. Giménez de Azcárate<sup>(2)</sup>, F. Cáceres<sup>(1)</sup>, J.M. Moreira<sup>(1)</sup>, D. de la Fuente<sup>(3)</sup>, A. Sebastián López<sup>(3)</sup>, J. Suárez Beltrán<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> *Secretaría General de Medio Ambiente y Agua. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente. Avda. Manuel Siurot, 50, 41071 Sevilla. {francisco.caceres, josem.moreira}@juntadeandalucia.es*

<sup>(2)</sup> *Red de Información Ambiental de Andalucía. Subdirección de Comunicación y Sistemas de Información. Agencia de Medio Ambiente y Agua. Johan Gutenberg, 1, Isla de la Cartuja, 41092 Sevilla. {emendez, jvales, ipino, lgranado, gmontoya, rprieto, icarpintero, fgimenezdeazcarate}@agenciamedioambienteyagua.es*

<sup>(3)</sup> *GMV. Juan de Herrera, 17, 47151 Boecillo, Valladolid. {dfuente, asebastian, jusuarez}@gmv.com*

## RESUMEN

La biomasa es un recurso forestal de gran importancia. La teledetección ha demostrado ser una herramienta muy útil para su determinación de manera rápida y efectiva en grandes extensiones de terreno. En este proyecto se han adquirido imágenes radar de distintas fechas procedentes del sensor ALOS-PALSAR, con objeto de desarrollar una metodología para la estimación de volúmenes maderables a partir de la correlación estadística de la señal radar y datos procedentes de inventarios, estableciendo regresiones basadas en modelos semi-empíricos para las distintas especies arbóreas presentes en la zona de estudio, calculando finalmente biomasa aérea mediante la utilización de ecuaciones alométricas.

**Palabras clave:** teledetección, radar, ALOS-PALSAR, biomasa forestal, Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

## ABSTRACT

*Biomass is a very important forest resource. Remote sensing has been proven to be a very useful tool for determining biomass quickly and effectively on large extensions of territory. In this project, radar images have been acquired from ALOS-PALSAR sensor from different dates, with the aim of developing a methodology for the estimation of wood volumes based on the statistic correlation between radar signal and other data from forest inventories, establishing regressions founded on semi-empiric models for the different tree species in the area of interest. Finally, aerial biomass has been calculated using allometric equations.*

**Keywords:** remote sensing, radar, ALOS-PALSAR, forest biomass, Environmental Information Network of Andalusia (REDIAM).

## 1. ANTECEDENTES

La biomasa forestal adquiere una importancia cada vez mayor dentro de los aprovechamientos del monte debido principalmente al aprovechamiento energético que puede obtenerse de ella constituyendo un combustible con claras ventajas medioambientales. Además, permite estimar las fijaciones de carbono derivadas de los crecimientos acumulados de las plantas y que se relacionan directamente con los procesos de cambio climático globales. Por ello, se hace necesario saber cuánta biomasa se pierde o se acumula con el tiempo y dónde se producen estos eventos.

En la actualidad, las estimaciones de biomasa se obtienen mediante relaciones alométricas derivadas de inventarios forestales (a pie de campo o mediante vuelos LiDAR de gran detalle) de gran precisión en ámbitos locales, pero su cadencia de actualización puede ser insuficiente para la estimación de biomasa a nivel

regional según los requerimientos de gestión medioambiental.

La teledetección puede ser una alternativa para las estimaciones regionales, aportando gran capacidad de observación del territorio en períodos de captación muy cortos y un detalle en la obtención de la distribución de las especies arbóreas que no aportan los inventarios clásicos. Los sensores radar de apertura sintética, SAR, representan una de las mejores oportunidades para este tipo de estudios (Luckman *et al.*, 1998). En particular el satélite ALOS dispone del sensor PALSAR que opera en la banda L, demostrada la más adecuada para la estimación de biomasa (Frasson *et al.*, 1999).

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal ha sido el análisis de viabilidad del uso de las tecnologías radar para la estimación de biomasa aérea forestal de las principales especies

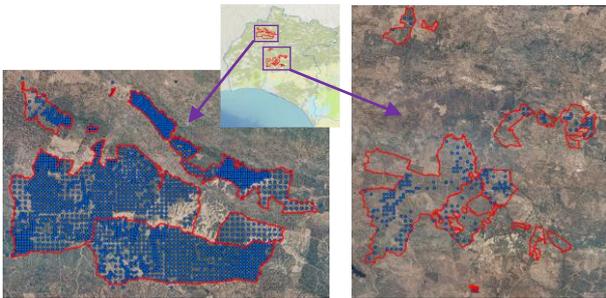
arbóreas de Andalucía, con el fin de determinar una metodología útil que pueda aplicarse en la extrapolación a un estudio de ámbito regional.

Asimismo, utilizando imágenes de 2008 y 2010, se ha estudiado su viabilidad para la estimación de la variación de biomasa entre estas fechas.

### 3. ÁMBITO DE ESTUDIO

Se han seleccionado dos zonas diferenciadas de la provincia de Huelva (Figura 1): Sierra Pelada y Rivera del Aserrador (Zona-A); Monte “Baldíos de Beas”, núcleo forestal “El Cobujón” y monte “Las Cumbres de Santa María” (Zona-B). Su elección está justificada por:

- Zonas representativas de las plantaciones típicas de eucaliptos y de algunas de las especies predominantes de pinos en Andalucía. Las especies forestales estudiadas son *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp. y *Quercus* spp.
- Muestra orográfica representativa del ámbito andaluz alternando extensiones de eucaliptares, pinares y encinares en valles, con otras en laderas con gran pendiente.
- Disponibilidad de inventarios exhaustivos de existencias basados en levantamientos clásicos de campo (Zona-A) y en el uso de sensores LiDAR (Zona-B), contemporáneos a la adquisición de las imágenes Radar.



**Figura 1.** Zonas de estudio (izda.: Zona-A; dcha.: Zona-B). Las nubes de puntos corresponden con el muestreo de campo.

### 4. MATERIAL Y MÉTODO

Para el cálculo de la biomasa aérea se han utilizado ecuaciones alométricas basadas en el volumen maderable por unidad de área (con corteza en caso de pinares y encinares y sin corteza para eucaliptares). Es por ello que se ha desarrollado una metodología que ha permitido la estimación de volúmenes a partir de imágenes radar capturadas en 2008 y datos procedentes de inventarios, fundamentada en la utilización de modelos semi-empíricos basados en el eco radar de la cubierta forestal. Posteriormente se ha calculado la biomasa aérea utilizando unas ecuaciones alométricas adecuadas para cada especie. Por otra parte, se ha implementado esta metodología a partir de imágenes de

2010 con objeto de estimar la variación de biomasa en el área de estudio entre ambas fechas.

#### 4.1. Adquisición y procesado de las imágenes

Para cubrir las dos zonas de estudio se capturaron dos imágenes radar en 2008 y dos en 2010 de 15 m de resolución geométrica. Fueron adquiridas por el sensor PALSAR a bordo del satélite japonés ALOS en banda L, emitiendo onda radar en polarización H y siendo la señal recogida en polarizaciones H y V.

Las imágenes han requerido de un pre-procesado en el que el eco radar registrado por el sensor se ha transformado en señal radar retrodispersada o backscattering, señal que muestra una relación positiva con ciertas variables estructurales de masas forestales a nivel de rodal como el volumen (LeToan *et al.*, 1992). El backscattering se ha calculado como el cociente entre el eco y la señal radar emitida por el sensor. Posteriormente se ha llevado a cabo un proceso de ortorrectificación de las imágenes para pasar la geometría radar al plano cartográfico.

#### 4.2. Pre-procesado de la información de partida

La información de partida disponible consistía en:

- Zona-A: Muestreo regular de parcelas procedente de un proyecto de Ordenación de Montes realizado en 2007-2008 mediante un procedimiento clásico de inventario forestal basado en muestreos de campo, estando los montes ordenados siguiendo la subdivisión habitual en superficies más pequeñas (monte, cuartel, cantón y rodal). No disponible cartografía de especies.
- Zona-B: Muestreo irregular de parcelas generado a partir de un vuelo fotogramétrico LiDAR realizado en 2008. No existe ordenación de montes pero sí una cartografía de especies.

El hecho de disponer de diferente información para cada zona, así como tener características orográficas distintas, ha llevado a que se desarrolle una aproximación metodológica en cada una.

Previamente, a la hora de definir las unidades mínimas de trabajo se ha tenido en cuenta, por un lado, el hecho de que el sistema radar genera un ruido que impide que se trabaje a nivel de píxel con la señal retrodispersada, ruido que se acrecienta con los mecanismos de dispersión propios de la cubierta forestal. Por ello, hay que trabajar con unidades mayores tales que el backscattering pueda promediarse a un número adecuado de píxeles de la misma tipología de especie, como es el rodal.

Por otro lado, las características propias del sensor, que captura las imágenes con un ángulo oblicuo sobre el territorio, hace que el backscattering esté condicionado por la topografía produciendo la existencia de zonas en sombra ocultas a la observación radar. Así, debido a la orografía severa que presenta la Zona-A (fuertes

pendientes), se comprobó que la señal radar no correlacionaba bien con la variable volumen a nivel de rodal y que, ampliando la superficie se atenuaba la influencia de la pendiente, por lo que se ha trabajado con una unidad mayor, el cantón (20-45 ha), y considerando solo los píxeles con una pendiente inferior a 26,8%. Se han utilizado ortofotos aéreas de 0.5 m PNOA de fecha cercana a la adquisición de las imágenes para generar una máscara a fin de considerar únicamente la cubierta forestal en cada cantón.

En la Zona-B, las ortofotos se han utilizado para segmentar el conjunto de montes y generar un nuevo registro de rodales (tamaño medio 2.5 ha) que se ajustara mejor a la realidad existente, tomando como base la cartografía de especies.

#### 4.3. Aproximación metodológica

De las imágenes disponibles se ha trabajado con el backscattering medido con polarización cruzada HV por estar ligado a la dispersión en volumen que se produce en el dosel (De la Fuente *et al.*, 2010).

Para estimar el volumen se han utilizado diferentes modelos, ya que se ha comprobado que el comportamiento del backscattering en relación con el volumen varía según la especie: para pinos, modelo semi-empírico denominado Water Cloud Model (WCM) (Attema *et al.*, 1978), que describe la respuesta de la cubierta vegetal a la señal radar incluyendo únicamente el backscattering como parámetro desconocido de la ecuación; para eucaliptos y encinas, modelo de regresión lineal porque es el que mejor correlaciona el backscattering con la verdad terreno en este tipo de masas cuando se usa la banda L (Castel *et al.*, 2000).

#### 4.4. Entrenamiento de los modelos

Comenzando con el 2008, la ausencia de cartografía de especies en la Zona-A ha llevado a trabajar en aquellos cantones en los que existe una única especie, ya que la existencia de varias causa pérdida de correlación del eco radar con el volumen total por hectárea. Así, se han descartado los encinares por no existir una muestra representativa suficiente, mezclándose en cada cantón con eucaliptos y/o pinos. En la Zona-B se distinguen eucaliptares, pinares y encinares.

Se ha extraído el volumen de aquellos cantones/rodales que contienen parcela de campo. Contabilizando el total de pares [backscattering, volumen], se han ordenado de menor a mayor volumen y seleccionado los números pares para entrenar y el resto para validar el modelo, de modo que todo el rango de volúmenes quedara presente tanto en el entrenamiento como en la validación.

En 2010, la carencia de datos de campo necesarios para entrenar los modelos se ha solucionado extrapolando el volumen de 2008 a 2010 utilizando el incremento anual recogido en la campaña de 2008 para la Zona-A y las ecuaciones de crecimiento del IFN3 para la Zona-B. En

este caso, no existe ecuación para las encinas, por lo que su volumen sólo se ha estimado para 2008.

#### 4.5. Estimación del volumen maderable. Validación

Con la ecuación (1) obtenida de la inversión del modelo WCM y la ecuación (2) a partir del modelo de regresión lineal, se han estimado los volúmenes de los cantones/rodales no utilizados en el entrenamiento.

$$VCC = -\frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{A - \sigma_{for}^o}{A - B} \right) \quad (1)$$

$$VSC = \left( \sigma_{for}^o - C \right) D \quad (2)$$

Siendo: VCC, volumen con corteza (m3/ha); VSC, volumen sin corteza (m3/ha);  $\sigma_{for}^o$ , backscattering (decibelios); A, B, C y D, los coeficientes obtenidos en los modelos de regresión.

Para la validación de los modelos a partir de los pares [backs, vol] destinados a ello, se han calculado los coeficientes de correlación y errores medios cuadráticos para cada caso de estudio (Tabla 1).

ZONA	ESP.	AÑO	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup> /ESP.	Rango Vol. en campo (m3/ha)
A	Pi	2008	0.80	11.76	0.83	3.40 – 125.10
		2010	0.86	8.94		3.80 – 135.50
	Eu	2008	0.71	21.06	0.71	3.19 – 146.58
		2010	0.71	21.06		5.30 – 199.95
B	Pi	2008	0.58	6.78	0.61	0.48 – 56.65
		2010	0.63	4.81		0.61 – 58.77
	Eu	2008	0.38	6.02	0.40	1.05 – 37.76
		2010	0.42	8.74		1.98 – 50.80
	En	2008	0.48	4.43	0.48	0.23 – 13.20

**Tabla 1.** Tabla de validación. (ESP.: especie; Pi: pino, Eu: eucalipto, En: encina).

#### 4.6. Cálculo de la biomasa aérea seca

Con los volúmenes estimados se ha calculado la biomasa aérea seca utilizando las ecuaciones mostradas en la tabla 2 (Polglase *et al.*, 1994; Sabaté *et al.*, 2005).

FRACCIÓN DE BIOMASA EN PESO SECO (Tn/ha)			
	FUSTE (BI_F)	RAMAS	HOJAS
Eu	$600 * VSC + 32 * (1 - e^{-3 * VSC})$	$14.9 * (1 - e^{-0.033 * BI_F})$	$(16 * 0.3 * BI_F) / (16 + 0.3 * BI_F)$
Pi	$0.46 * VCC$	$0.16 * VCC$	$0.035 * VCC$
En	$0.69 * VCC$	$0.37 * VCC$	$0.049 * VCC$

**Tabla 2.** Ecuaciones alométricas.

### 5. RESULTADOS Y VALIDACIÓN

El análisis de los resultados consistió en la comparación de los volúmenes estimados respecto de otras fuentes: inventarios de 2008 no utilizados en el entrenamiento y datos procedentes de un estudio realizado en Andalucía en 2011 para el cálculo de la biomasa de coníferas a

partir de un modelo basado en 36 variables ambientales (Guzmán *et al.*, 2012).

Los resultados obtenidos en la Zona-A en 2008 se consideran buenos para las dos especies estudiadas, alcanzando un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.87 en pino y 0.66 en eucalipto, considerando la influencia de las fuertes pendientes sobre el backscattering. En 2010, se ha realizado el análisis sólo para las especies de pino a partir del modelo de 36 variables, encontrando una buena correlación ( $R^2$  de 0.85).

En la Zona-B se han obtenido peores resultados debido principalmente a que los volúmenes por especie son inferiores a 60 m<sup>3</sup>/ha, hay mayor influencia del suelo en la señal radar que llega al sensor y por tanto el comportamiento del backscattering es más aleatorio. El  $R^2$  obtenido para pino es de 0.44.

Se ha observado saturación del backscattering en pino en la Zona-A superados los 100 m<sup>3</sup>/ha, no así en la Zona-B (menor rango de existencias de volúmenes). Esta limitación de la tecnología SAR, surgida cuando se usa el coeficiente de backscattering para la obtención de biomasa, puede evitarse con herramientas más avanzadas como la interferometría y/o interferometría polarimétrica, con las que es posible obtener mejores estimas (Treuhaft *et al.*, 2004).

## 6. CONCLUSIÓN

Se observa que los mejores registros se obtienen para el caso de los pinos, mejor en la Zona-A pese a su orografía más complicada, pero con mayor existencia de volúmenes. En eucaliptos se ha obtenido menor  $R^2$  debido en parte a la naturaleza del modelo empleado, empírico, que depende en gran medida de que los datos de campo estén homogéneamente distribuidos. En encinas no se obtienen buenos resultados debido a que se trata de volúmenes muy bajos que hacen que la dispersión del suelo prime sobre la de las encinas.

Analizando los resultados de 2010, partiendo del hecho de que los volúmenes utilizados han sido calculados a partir de ecuaciones de crecimiento, se han detectado zonas donde este volumen indica un crecimiento mientras que el estimado indica una disminución. Esta discrepancia ha llevado a la detección de actuaciones silvícolas (clareos, cortas) realizadas entre 2008 y 2010. La elección de las dos zonas ha sido muy útil para establecer una aproximación metodológica para un estudio a nivel regional. Los modelos se entrenarían a nivel de entidad territorial, siendo necesario disponer de cartografía derivada de una ordenación de montes o bien proceder a una segmentación a partir de cartografía de especies (en la región se dispone del SIG del Patrimonio Natural de Andalucía). Se aconsejaría un análisis previo de la orografía de las zonas de estudio, una evaluación de la información de campo y un análisis de la distribución y comportamiento de una misma especie a nivel regional, ya que esto puede llevar al

establecimiento de diferentes modelos numéricos de relación entre las imágenes de satélite y la realidad observada para poder estimar correctamente los volúmenes de las masas forestales estudiadas.

La estimación en base a observación directa del territorio a través de técnicas de teledetección puede aportar información más fiable que métodos de estimación y de escenarios futuros.

## 7. BIBLOGRAFÍA

ATTEMA, E.P.W. & ULABY, F.T. 1978. *Vegetation model as a water cloud*. Radio Science 13 (2).

CASTEL, T., MARTINEZ, J.M., BEAUDOIN, A., WEGMÜLLER, U. & STROZZI, T. 2000. *ERS INSAR data for remote sensing hilly forested areas*. Remote Sensing of Environment, 73, 73-86.

DE LA FUENTE, D., CASANOVA, J.L., CALLE, A. & SANZ, J. 2010. *Radar remote sensing applied to the forest management: measurement of stem volumen with bark*. Forestsat 2010: Operational tools in forestry using remote sensing techniques. Proceedings book.

FRASSON, J.E.S. & ISRAELSSON, H. 1999. *Estimation of stem volume in boreal forests using ERS-1 C- and JERS-1 L-band SAR data*. International Journal of Remote Sensing, 20, pp.

GUZMAN, J.R., VENEGAS, J., SESEÑA, A., SILLERO, M.L. & RODRIGUEZ, J.A. 2012. *Biomasa forestal en Andalucía. 1. Modelo de existencias, crecimiento y producción. Coníferas*. CAPMA, Junta de Andalucía.

LETOAN, T., BEAUDOIN, A., RIOM, J. & GUYON, D. 1992. *Relating forest biomass to SAR data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30 (2), 403-411.

LUCKMAN, A., BAKER, J., HONZAK, M. & LUCAS, R. 1998. *Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR: seasonal variation, confidence limits and application to image mosaics*. Remote Sensing of Environment, 63, 126-139.

POLGLASE, P.J., ADAMS, M.A. & ATTIWILL, P.M. 1994. *Measurement of modeling of carbon storage in a chronosequence of mountain ash forest: implications for regional and global carbon budgets*. CSIRO report.

SABATÉ, S., GRACIA, C.A., VAYREDA, J. & IBÁÑEZ, J. 2005. *Differences among species in aboveground biomass expansion factors in Mediterranean forests*. Forest ecology and management.

TREUHAFT, R.N. & SIQUEIRA, P.R. 2004. *The calculated performance of forest structure and biomass estimates from interferometric radar*. Waves Random Media, 14 (2), S345-S358.