

---

---

## XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.

---

---

# Evaluación de métodos de interpolación utilizados en la creación de modelos digitales de elevaciones para la normalización de la nube de puntos LIDAR-PNOA en aplicaciones forestales

A.L. Montealegre<sup>a c\*</sup>, M.T. Lamelas<sup>b c</sup>, J. de la Riva<sup>a c</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Geografía y O.T., Universidad de Zaragoza*

<sup>b</sup>*Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar*

<sup>c</sup>*Grupo GEOFOREST-IUCA, Universidad de Zaragoza*

---

### Resumen

España cuenta desde el año 2008 con datos LiDAR de todo su territorio, capturados en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). La existencia de esta nueva información ha creado la necesidad de investigar sobre su procesamiento, así como sus posibilidades y limitaciones para los distintos ámbitos de aplicación, entre los que se encuentran los espacios forestales. En este contexto, el objetivo principal de la investigación ha sido analizar la idoneidad de diferentes métodos de interpolación de la nube de puntos del vuelo LiDAR-PNOA, en un ambiente forestal mediterráneo dominado por *Pinus halepensis* y *Quercus coccifera*, en el entorno de Zaragoza (Aragón). Se han seleccionado dos zonas test y se han aplicado seis métodos de interpolación distintos con dos pasos de malla diferentes (1 y 2 metros). Asimismo, se ha analizado la influencia de cuatro variables en el error de interpolación (pendiente del terreno, densidad de puntos, penetración de los pulsos y cobertura del suelo). La validación de los MDEs realizada con el 20% de la muestra, revela que el mejor interpolador es TIN a ráster, con una resolución de 1 m (ECM de 2,68 cm). Se ha evidenciado que la densidad de retornos de suelo, la resolución espacial del ráster y la complejidad morfológica del terreno afectan a la capacidad de los interpoladores para generar MDEs precisos. Finalmente, la validación realizada con

---

\* E-mail: monteale@unizar.es.

puntos de control tomados con GPS en el campo y los mayores errores obtenidos, indican que es necesario realizar análisis más exhaustivos con un mayor número de puntos de control.

Palabras clave: LiDAR; PNOA; MDE; interpolación; normalización; forestal.

---

## 1. Introducción

Los MDEs constituyen una base de información esencial para numerosas aplicaciones que requieren disponer de la variable geográfica “altura”, como es el caso de la estimación de parámetros dasométricos, necesarios para la gestión de los espacios forestales.

En el último decenio, la tecnología LiDAR ha emergido como un interesante sistema de teledetección activa capaz de adquirir densas y precisas colecciones de puntos con coordenadas x, y, z. A diferencia de las técnicas estereoscópicas y fotogramétricas tradicionales, el conjunto de datos resultante constituye una nube de puntos que permite reconstruir la superficie topográfica, incluso en zonas donde está oculta por el dosel forestal, gracias a la capacidad de penetración de los pulsos láser a través de los huecos en la vegetación y al registro de múltiples retornos o ecos de un pulso. Sin embargo el LiDAR hace un submuestro aleatorio de la superficie que explora, siendo necesarias dos tareas fundamentales para generar un MDE: separar o filtrar los retornos del terreno del resto de información (vegetación, elementos antrópicos) e interpolar dichos datos para producir una superficie continua (Vosselman y Maas, 2010).

Estudios previos han demostrado que la precisión de los MDEs derivados del LiDAR no solo está influenciada por los procesos que implican la manipulación de los puntos (método de filtrado y de interpolación elegidos), sino también por una serie de factores externos, tales como la variabilidad topográfica, la densidad de retornos de suelo, la complejidad estructural del dosel vegetal y la resolución espacial, (Bater y Coops, 2009). Por estas razones, conocer la calidad de un MDE generado con datos LiDAR es esencial, especialmente en los espacios forestales donde son necesarios para normalizar las alturas de la vegetación, pues podrá condicionar los resultados de las técnicas de modelado espacial aplicadas.

En este contexto, los principales objetivos de esta investigación han sido dos: primero, mediante el examen de seis rutinas de interpolación, identificar las combinaciones más precisas entre el tipo de interpolador y la resolución espacial, 1 o 2 m, para la creación de MDEs; y segundo, analizar los efectos de la pendiente del terreno, la densidad de puntos de suelo, la capacidad de penetración de los pulsos y las coberturas de suelo en los errores de interpolación.

## 2. Metodología, materiales, datos y herramientas

### 2.1. Zona de estudio

El área de estudio se compone de dos zonas test, T1 (2x2 km) y T2 (4x2 km), situadas en el valle medio del Ebro (Figura 1). El relieve de la zona presenta alturas entre 400-750 m.s.n.m. y pendientes de moderadas a fuertes. El paisaje es típicamente mediterráneo, donde los bosques homogéneos de *Pinus halepensis* Mill. cubren aproximadamente 734 ha. La vegetación arbustiva, dominada por *Quercus coccifera*, se mezcla con *Juniperus oxycedrus* L. subsp. *Macrocarpa*, *Thymnus vulgaris* y con cultivos de cereales. Además, la zona de estudio ha sido afectada por incendios forestales (en junio de 1995 y agosto de 2008), estando actualmente cubierta por especies arbustivas rebrotadoras.

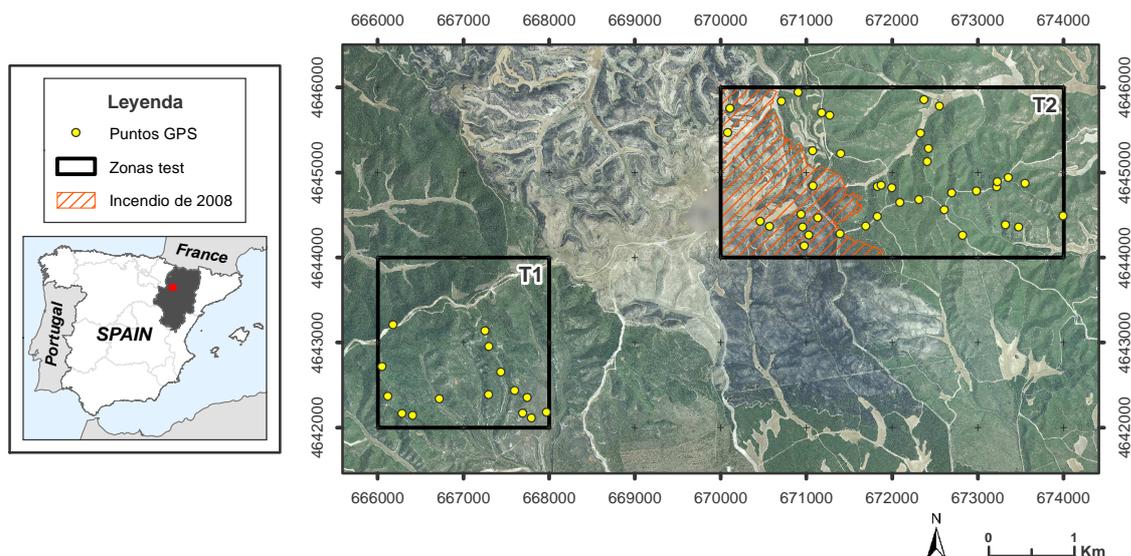


Fig. 1. Localización del área de estudio.

## 2.2. Procesamiento de los datos LiDAR

Los datos LiDAR utilizados, proporcionados por el PNOA, se capturaron en los meses de enero y febrero del año 2011, con un sensor de pulsos discretos de hasta 4 retornos. La precisión altimétrica es  $\leq 0,20$  m y la discrepancia altimétrica entre pasadas  $\leq 0,40$  m. La información fue suministrada sin clasificar, por lo que, se llevó a cabo un proceso de filtrado para separar los retornos de terreno del resto de información topográfica. Se utilizó el software libre MCC-LIDAR 2.1 que incluye el algoritmo iterativo de curvatura multiescala desarrollado por Evans y Hudak (2007). De acuerdo con Montealegre et al. (2013), este algoritmo diseñado para ambientes forestales y de topografía compleja equilibra los errores de comisión y omisión para aplicaciones forestales. Posteriormente, los puntos de suelo desnudo se dividieron aleatoriamente en dos muestras independientes de entrenamiento (8.204.940 puntos-80%) para generar los MDEs, y de validación de los modelos (2.051.235 puntos-20%). Teniendo en cuenta que la densidad de puntos de las zonas test era de 1 punto/m<sup>2</sup>, se decidió generar MDEs con altas resoluciones espaciales de 1 y 2 metros.

## 2.3. Puntos de control GPS

Para garantizar una validación independiente de la muestra de datos LiDAR, se tomaron aleatoriamente un total de 55 puntos de control utilizando un equipo GPS-GNSS modelo GS15 de Leica (ver Figura 1). La precisión altimétrica media de los puntos medidos fue de 2.37 cm, ocho veces superior a la de los puntos LiDAR.

## 2.4. Interpolación de la nube de puntos LiDAR filtrada

Los métodos de interpolación utilizados han permitido crear superficies ráster de dos resoluciones diferentes, 1 y 2 m, a partir del conjunto de puntos LiDAR correspondientes al suelo (Renslow, 2012). A continuación se definen cada uno de ellos.

El vecino natural (NN) halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto objetivo y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar el valor.

La distancia inversa ponderada (IDW) asigna a cada celda de salida el resultado de la media ponderada por la distancia a los puntos encontrados dentro de un radio de búsqueda determinado en la vecindad de dicha celda.

El kriging ordinario (OK) es un procedimiento geoestadístico que presupone que la distancia o la dirección entre los puntos reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie a estimar.

El topo a ráster (ANUDEM) utiliza una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa.

El TIN a ráster (TR) se basa en crear previamente una red irregular de vectores usando triángulos Delaunay para unir los puntos y posteriormente a cada celda ráster se le asigna una altura en función del TIN.

Todos los métodos hasta aquí mencionados se han implementado en ArcGIS 10.1, mientras que el siguiente método (de punto a ráster) se ha realizado con FUSION 3.30 por ser uno de los software de código abierto más utilizados actualmente para el manejo de datos LiDAR con propósitos forestales. El punto a ráster (PR) crea una superficie en la que cada píxel representa la elevación media de todos los puntos dentro del mismo.

### 2.5. Factores que influyen en la precisión de la interpolación

Con el fin de examinar la influencia de la pendiente sobre la exactitud de los MDEs obtenidos, se generó un mapa vectorial de pendientes derivado de un TIN y se clasificaron en tres categorías (Figura. 2a).

La proporción de pulsos que penetran en el dosel y llegan hasta el suelo se calculó utilizando el comando "Cover" incluido en FUSION 3.30. El ráster resultante con un paso de malla de 15 metros se reclasificó en cuatro clases (Figura. 2b).

La densidad de puntos de suelo se calculó contando el número de retornos dentro de un píxel de 1 m<sup>2</sup>. Esta variable continua fue discretizada en 5 rangos de densidad (Figura. 2d).

Por último se realizó un análisis de la variedad de cubiertas existentes en T1 y T2 sobre la base del Corine Land Cover con apoyo en la ortofotografía del PNOA. Esto permitió distinguir seis clases de cubierta: bosque de coníferas (43,8%), matorrales (25,0%), zona incendiada en 2008 (19,2%), cultivos y pastizales naturales (9,6%) y terrazas de repoblación (2,5%) (Figura. 2c).

### 2.6. Validación de los MDEs generados

Los MDEs se validaron con la muestra de prueba y con los puntos de control GPS para comparar los sesgos y la precisión de las superficies. Para cada MDE se calcularon los errores verticales residuales para cada punto y otros estadísticos globales como el error medio (EM), el error medio absoluto (EMA) y el error cuadrático medio (ECM). Por otro lado, se examinó la precisión de los modelos en función de los factores que influyen en la misma a partir de los EMA obtenidos.

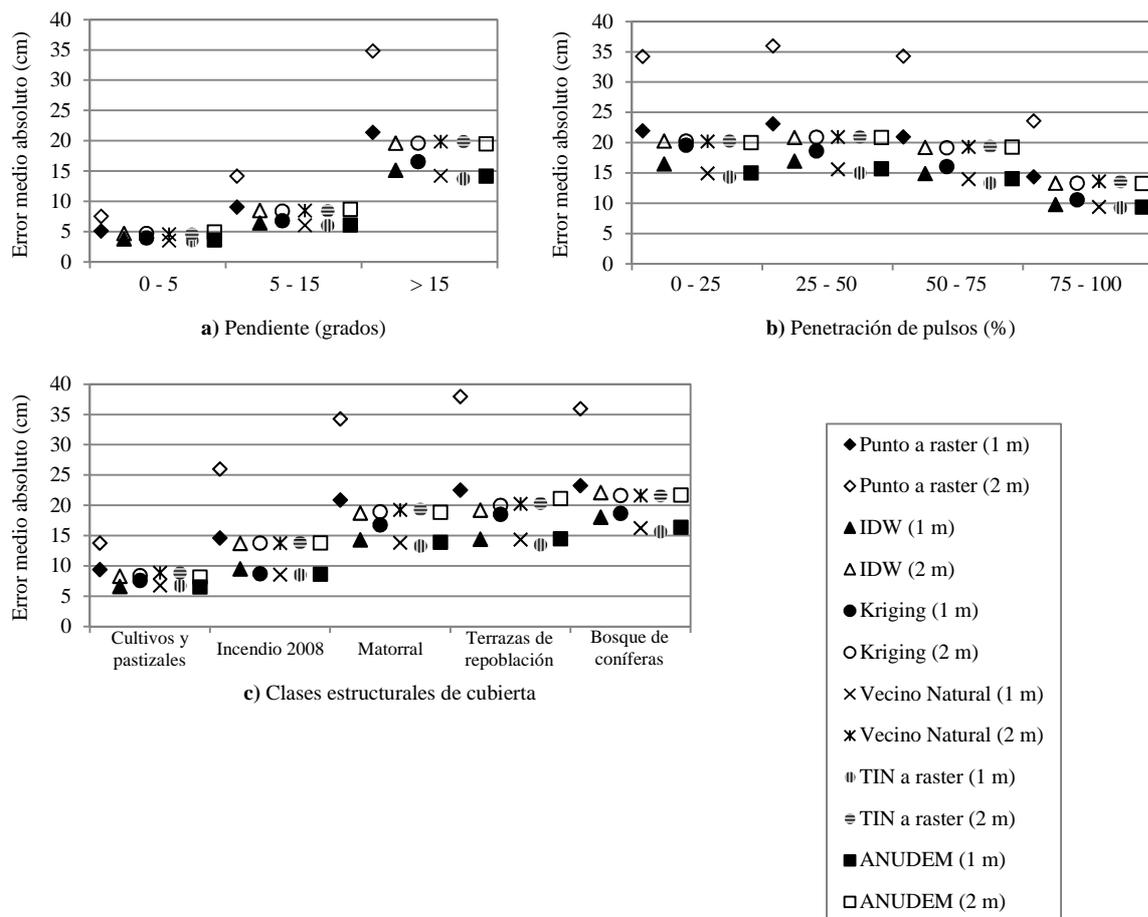
## 3. Resultados

Los resultados de la validación de los MDEs se presentan en la tabla 1. En todos los algoritmos de interpolación los EM fueron sub-centimétricos (a excepción de PR), lo que indica que los sesgos en las interpolaciones fueron insignificantes. Los ECM aumentaron al disminuir la resolución de 1 m a 2 m y el mejor resultado se obtuvo con TR (2,68 cm). Los EMA también fueron muy consistentes entre interpoladores y variaron más entre resoluciones espaciales.

Tabla 1. Estadísticas globales del error vertical por tipo de interpolador y resolución.

Método de interpolación (MDE 1x1 m)	EM (cm)	Rango del error (m)	ECM (cm)	EMA (cm)	Método de interpolación (MDE 2x2 m)	EM (cm)	Rango del error (m)	ECM (cm)	EMA (cm)
TIN a ráster (TR)	0,59	6,64	2,68	11,73	Kriging Ordinario (OK)	0,48	6,94	5,25	16,25
Vecino Natural (NN)	0,03	8,57	2,95	12,14	ANUDEM	0,16	6,46	5,42	16,73
ANUDEM	-0,10	6,37	2,99	12,14	TIN a ráster (TR)	0,86	7,43	5,48	16,94
IDW	-0,32	6,58	3,64	12,90	Vecino Natural (NN)	0,86	6,96	5,52	16,94
Kriging Ordinario (OK)	-0,90	8,86	3,91	14,08	IDW	0,32	6,57	5,74	16,74
Punto a ráster (PR)	-1,29	8,69	6,64	18,25	Punto a ráster (PR)	-2,73	8,48	17,67	29,54

Con respecto a la influencia de diferentes variables en la precisión de los modelos, se puede observar en la figura 2 que a medida que aumenta la pendiente (a), especialmente cuando son superiores a 15° los EMA también lo hacen, mientras que los EMA decrecen conforme aumenta el porcentaje de penetración de pulsos láser que alcanzan el suelo (b) y por consiguiente se incrementa la densidad de retornos de suelo desnudo (d). En el caso de las clases de cubierta (c), los EMA son bajos en cultivos y pastizales y van creciendo conforme la complejidad y la densidad de la vegetación aumenta. En todos los casos la resolución de 1 m resulta más precisa y el método TR se convierte en el más adecuado para cualquier tipo de pendiente, para densidades de puntos bajas (<0,5 puntos/m<sup>2</sup>) y para coberturas de suelo complejas. Es importante destacar que conforme se incrementa la complejidad del terreno (mayores pendientes y cubierta vegetal), las diferencias entre los EMA obtenidos en resoluciones de 1 y 2 m son mayores.



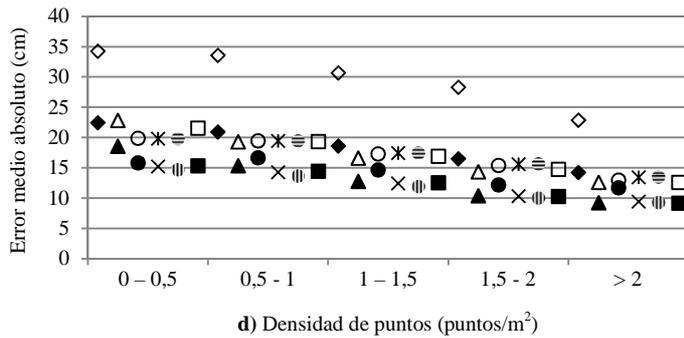


Fig. 2. Efecto de la pendiente (a), de la penetración de los pulsos (b), de las clases de cubierta (c) y de la densidad de puntos (d) sobre el error absoluto medio por tipo de interpolación y resolución.

Por otro lado, en la tabla 2 se muestran las estadísticas globales del error vertical por tipo de interpolador y resolución obtenidas de la validación con los 55 puntos GPS. Como se puede apreciar, los resultados difieren a los recogidos en la tabla 1 porque, aunque siguen siendo más precisos los MDEs de resolución de un 1 m, los errores son más elevados en todos ellos y en este caso el IDW es el que presenta mejores resultados (ECM de 37 cm).

Tabla 2. Estadísticas globales del error vertical por tipo de interpolador y resolución obtenidas de la validación con GPS.

Método de interpolación (MDE 1x1 m)	EM (cm)	Rango del error (m)	ECM (cm)	EMA (cm)	Método de interpolación (MDE 2x2 m)	EM (cm)	Rango del error (m)	ECM (cm)	EMA (cm)
IDW	30	1,29	37	30	IDW	30	1,55	41	31
Kriging Ordinario (OK)	30	1,25	38	30	ANUDEM	32	1,39	43	34
Vecino Natural (NN)	33	1,31	40	33	Kriging Ordinario (OK)	33	1,61	44	33
TIN a ráster (TR)	33	1,4	43	33	Vecino Natural (NN)	33	1,90	46	33
ANUDEM	34	1,53	45	34	TIN a ráster (TR)	34	1,48	47	34
Punto a ráster (PR)	37	1,90	51	37	Punto a ráster (PR)	40	2,68	63	41

#### 4. Discusión y conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, y las investigaciones previas realizadas por otros autores, no existe un método de interpolación que sea universalmente mejor que los demás. Cada interpolador produce predicciones usando diferentes suposiciones acerca de los datos, por lo que un MDE puede dar cuenta de la variación local mejor que otro en función de diversos factores (Bater y Coops, 2009).

En general, la precisión de los MDE ha sido mayor con la resolución espacial de 1 m, lo que indica que la elección del tamaño del píxel puede ser más importante que la elección del tipo de interpolador. Además, las diferencias entre resoluciones son más importantes en terrenos que presentan mayor complejidad topográfica y cubierta vegetal. La validación con los puntos GPS mostró unos errores de interpolación mayores a los obtenidos con los propios puntos LiDAR (mucho más numerosos y dependientes del error de adquisición y del filtrado).

Del análisis de la influencia de diferentes variables en los errores de interpolación, se desprende que todas causan un aumento en los EMA en determinadas condiciones, como por ejemplo valores elevados de pendiente y bajas densidades de puntos. El método TIN a ráster resultó ser el menos sensible a la influencia de estas variables explicativas analizadas, si bien es cierto que todos los interpoladores presentaron precisiones similares tanto en términos globales, como en las estratificaciones por factores influyentes en el error.

Se ha evidenciado que la densidad de retornos de suelo (que es dependiente de la configuración del sistema LiDAR y de la cobertura vegetal existente en la zona), la resolución espacial del ráster y la complejidad morfológica del terreno, afectan a la capacidad de los interpoladores para generar MDEs precisos. En este sentido se puede concluir que el método TIN a ráster es el más preciso en términos generales y además cuenta con la ventaja de que no tiene parámetros ajustables complejos, como sucede con el kriging, que puedan introducir variaciones por parte del usuario. No obstante, el mayor error obtenido al utilizar la muestra de puntos tomada en el campo, pone de manifiesto que al utilizar la nube de puntos LiDAR para validar la interpolación, se están ajustando los modelos a los datos LiDAR, pero no con la realidad. En este sentido, en el futuro sería conveniente realizar un análisis más exhaustivo de la precisión de estos interpoladores con una mayor muestra de puntos de control medidos en campo.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al IGN y al CNIG los datos LiDAR proporcionados.

### Referencias

- Bater, C.W. & Coops, N.C. (2009). Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, 35, 289-300.
- Evans, J.S. & Hudak, A. T. (2007). A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4), 1029-1038.
- Montealegre, A.L., Lamelas, T. & de la Riva, J. (2013). Evaluación de métodos de filtrado para la clasificación de la nube de puntos del vuelo LiDAR PNOA. In A. Fernández-Renau & E. de Miguel (Eds), *Teledetección. Sistemas operacionales de observación de la Tierra*, (pp. 184-187). Madrid, INTA.
- Renslow, M.S. (2012). *Manual of Airborne Topographic LiDAR*. Bethesda: ASPRS.
- Vosselman, G. & Maas, H. G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing.