

Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F. y Alonso Bernardo, D. (2010): Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LIDAR. 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. 254-271. ISBN: 978-84-472-1294-1

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES MEDIANTE DATOS LIDAR

Moreno Brotóns, J.¹, Alonso Sarría, F.², Gomariz Castillo, F.³, y Alonso Bernardo, D.

(1) Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua. Complejo de Espinardo, Carretera N-301, 30100, Espinardo (Murcia).
jesusmb@um.es

(2) Instituto del Agua y Medio Ambiente, Universidad de Murcia. Edificio D, Campus de Espinardo, 30100, Espinardo (Murcia).
alonsarp@um.es

(3) Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua. Complejo de Espinardo, Carretera N-301, 30100, Espinardo (Murcia).
fjgomariz@um.es

RESUMEN

La modelización del terreno resulta de vital importancia en multitud de áreas como la climatología o la hidrología entre otras, siendo en muchas ocasiones uno de los factores determinantes de la calidad de sus estudios. En este trabajo se realiza un análisis comparativo entre Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados mediante diferentes métodos de interpolación y uno obtenido mediante tecnología LIDAR. De esta forma, asumiendo este último como verdad-terreno, se establece cual de los modelos interpolados representa con mayor fidelidad la superficie terrestre.

Las técnicas de interpolación utilizadas han sido la lineal, splines, TIN y ANUDEM obteniendo un total de 4 MDEs interpolados. El análisis de los errores en los diferentes modelos se ha llevado a cabo mediante tres procedimientos

1. Análisis de la distribución del error de las elevaciones en los MDEs interpolados.
2. Evaluación de los errores en varias capas de variables derivadas del MDE
3. Evaluación de los errores de localización de las redes de drenaje extraídas de los diferentes modelos respecto a la red generada a partir del modelo LIDAR. Con respecto a la ubicación de la red de drenaje, se han estimado dos tipos de error: error de omisión y error de comisión.

Palabras Clave: MDE, interpolación, LIDAR, validación, verdad-terreno.

ABSTRACT

Terrain modelling is an important task in many scientific areas such as climatology, hydrology among others, with a deep influence on the quality of the results. In this work we make a comparative analysis of Digital Elevation Model (DEM) generated by different interpolation algorithms with one obtained by LIDAR technology, assuming the later as ground truth.

Four different interpolation algorithms have been used: linear splines, TIN and ANUDEM, that means a total of four interpolated DEMs. The analysis of errors in the different models was carried out with three different procedures:

1. *Error distribution analysis in the interpolated DEMs.*
2. *Error evaluation in terrain parameters derived from DEM.*

3. *Analysis of the positional errors in the extracted drainage networks from different models. An ad hoc approach has been developed to measure this positional error.*

Key Words: DEM, interpolation, LIDAR, validation, ground- truth

INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (MDT). Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo. Se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente raster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

Los métodos para generar un MDE pueden clasificarse en tres grandes grupos (Nelson et al., 2009):

- **Métodos directos**, topografía tradicional o con GPS;
- **Métodos basados en sensores remotos**, fotogrametría o más recientemente radar y LIDAR;

9. **Interpolación a partir de curvas de nivel**, hoy día es fácil (al menos en los países desarrollados) disponer de curvas de nivel en formato digital a varias escalas.

Los métodos directos son los más exactos y precisos pudiéndose incluso controlar dicha precisión, pero son caros y limitados a poca superficie. Los métodos basados en sensores remotos permiten abarcar mayor extensión, aunque con exactitud menor y dependiente de las características del terreno, el coste (tanto monetario como en tiempo de cómputo) se dispara para áreas grandes. Tradicionalmente, el método más habitual para generar un MDE ha sido la interpolación a partir de curvas de nivel digitalizadas a partir de mapas topográficos. Hoy día sin embargo se dispone de curvas de nivel en formato digital a varias escalas con lo que el procedimiento resulta mucho más rápido y menos costoso.

LIDAR

El LIDAR (Light Detection and Ranging) es un sistema láser activo, montado generalmente sobre una avión, capaz de emitir pulsos de luz láser en la banda del espectro electromagnético comprendido entre el infrarrojo y el ultravioleta (500 - 1500 nm), para posteriormente capturar la señal reflejada por la superficie barrida. Midiendo el tiempo empleado por cada una de las señales emitidas (pulsos) en recorrer el espacio que separa al transmisor de la superficie del terreno. El retraso medido indica la distancia entre el sensor y la superficie terrestre. Un receptor GPS que proporciona la posición y la altura del avión en cada momento, y un sistema inercial (INS) que informa de los giros del avión y de su trayectoria. Se obtiene así de forma casi instantánea una nube muy densa (entorno a un punto cada 40 cm y entre 5000 y 100.000 puntos por segundo) de puntos sobre el terreno cuyas coordenadas (x,y,z) quedan registradas con gran precisión (Baltsavias, 1999; Hodgson et al., 2005).

Los errores de medición están entorno a 15 cm en la vertical y 50-100 cm en la horizontal, siendo estos muy dependientes de la configuración del terreno (Nelson et al., 2009).

Un sistema LIDAR puede discriminar entre múltiples respuestas recibidas desde la superficie para un mismo pulso, permitiendo determinar las superficies intermedias, como líneas de tensión o coberturas vegetales. En la actualidad, se dispone de varios tipos: los que reconocen hasta 7 pulsos, los que sólo reconocen el primer pulso, los que sólo reconocen el último, los que reconocen el primero y el último, etc. Gracias a la recepción de los múltiples pulsos y a la aplicación de filtros adecuados, se podrá analizar la información recibida, discriminando entre los diferentes pulsos e identificando el tipo de superficie objeto de la medición.

Los resultados fundamentales de los vuelos LIDAR son (Baltsavias, 1999; Liu et al., 2007):

- **Modelo Digital del Terreno**, obtenido a partir de la interpolación de los puntos procedentes del último pulso (base de la modelización hidrológica/hidráulica);
- **Modelo Digital de Alturas de Objetos**, obtenido a partir de la interpolación de los puntos del primer pulso, sobre el cual podemos distinguir y cartografiar múltiples elementos que no era posible capturarlos de forma remota hasta el momento, tales como edificios, vegetación, presas, puentes, diques, etc.;

- **Modelo de Intensidades**, donde a partir de la amplitud de la señal que vuelve al avión después de reflejarse en la superficie terrestre obtenemos una imagen de intensidades que permite realizar distinciones entre superficies, identificando puentes, carreteras, etc.;
- **Ortofotografía en verdadera proyección**, el sistema LIDAR se puede integrar con una cámara digital para obtener imágenes perfectamente georreferenciadas en las que se corrige incluso las distorsiones de paralaje debidas a la topografía.

En la Región de Murcia se dispone de un MDE con resolución de 4 metros a partir del proyecto **NatMur08**, desarrollado por la Dirección General del Medio Natural (DGMN) de la Región de Murcia (D.G.M.N., 2008). Surgió ante la necesidad de disponer de información geográfica actualizada y de calidad y fue llevado a cabo por la empresa Este-reocarto. En el verano de 2008 se realizó un vuelo para la realización de una ortoimagen digital color de alta resolución del conjunto de la Región de Murcia.

El carácter innovador de este vuelo fotogramétrico radica en ser el primer proyecto en la Región de Murcia (y el primero en España de un territorio tan extenso) que utiliza la combinación de cámaras fotogramétricas digitales con un sensor LIDAR. El Modelo digital de elevaciones obtenido se utiliza para ortorrectificar la imagen con lo que se obtiene una gran exactitud posicional. El inconveniente reside en que sólo se tomó un punto cada 4 metros con lo que los valores de altura de los objetos quedan muy indeterminados.

El resultado final consiste en:

- Ortofotografía en color de 2 metros de tamaño de celdilla;
- Ortofotografía pancromática (blanco y negro) con 0.4 metros de tamaño de celdilla;
- Modelo digital de elevaciones con 4 metros de tamaño de celdilla;
- Modelo digital de alturas con 4 metros de tamaño de celdilla.

A pesar de los filtrados y análisis llevados a cabo sobre la nube de puntos, se han observado errores posicionales y altitudinales de cierta entidad debido al efecto de sombreado y de la topografía compleja sobre el resultado. Sin embargo si se aprecia que la consistencia hidrológica del modelo es elevada (Romero-Díaz et al., 2009).

Algoritmos de interpolación para generar un MDE

Se han propuesto diferentes algoritmos de interpolación a partir de curvas de nivel, así como múltiples métodos para establecer comparaciones entre los mismos (Wise, 2000; Li et al., 2005) llegando a la conclusión de que no existe un único algoritmo óptimo en todas las situaciones (Nelson et al., 2009).

Entre los métodos usuales destacan:

- Media ponderada por inverso de la distancia a partir de la transformación de las líneas en puntos;
- Interpolación lineal a partir de curvas de nivel rasterizadas (Neteler y Mitásová, 2008);
- Splines, la interpolación se realiza ajustando un conjunto de funciones a los datos de entrada. El usuario puede modificar las características de la superficie generada manipulando dos parámetros de tensión y suavizado (Mitásová y Hofierka, 1993), sugiriendo que los splines regularizados con un parámetro de tensión adecuado serían el algoritmo de interpolación más adecuado, produciendo superficies suavizadas y ajustadas a las curvas; también puede obtener sus derivadas de manera que el mismo método genera mapas de pendientes, orientaciones y otras variables topográficas del MDT;
- Red Irregular de Triángulos, las curvas de nivel se descomponen en puntos a partir de los que se crea una triangulación óptima. Los valores de altitud, pendiente y orientación se interpolan en el interior de cada triángulo mediante operaciones geométricas a partir de las coordenadas de los vértices. Una posibilidad interesante es que permite utilizar información secundaria (red de drenaje, divisorias y otras líneas de ruptura);
- ANUDEM, utiliza una interpolación iterativa en diferencias finitas (Hutchinson, 1996);
- Utilización de regresión-krigeado incluyendo líneas de ruptura (Hengl et al., 2008);
- Método de mínima curvatura, implementado en programas como Idrisi o Surfer (Fogg, 1984).

A pesar de la gran aceptación conseguida por el LIDAR, los métodos de interpolación a partir de curvas de nivel siguen siendo relevantes por diversas razones:

- Dificultades para disponer de un LIDAR a escala regional;
- Necesidad de completar áreas de trabajo;
- Posibilidad de combinar LIDAR con interpolados. La forma más robusta de mejorar la calidad de un MDE es promediar los valores de diferentes MDE utilizando como factor de ponderación la estimación del error en cada uno de los DEM (Reuter et al., 2009).

Los Modelos Digitales de Elevación basados en sensores remotos tienen una densidad de muestreo muy alta y regular, de modo que son más precisos en la representación de meso y micro-relieve, pero están sujetos a errores de medición debidos a las limitaciones físicas del instrumento. También reflejan sólo la topografía de la superficie de los objetos y no de la superficie terrestre. En general, en zonas con vegetación un MDE derivado de mapas topográficos basados en estudio de campo será mucho más fiable que los obtenidos por radar.

Por estas razones, a pesar del uso cada vez mayor de MDEs derivados de vuelos LIDAR, parece claro que seguirá siendo necesaria la utilización de MDEs interpolados.

Caracterización de errores en un mapa de elevaciones

Los errores en un MDE y en los productos derivados pueden agruparse (Wise, 2000) en tres grandes tipos:

- Artefactos o errores de bulto generalmente debido a errores de etiquetado en curvas de nivel, a menudo son difíciles de detectar en el MDE pero se aprecian adecuadamente en los mapas de variables del terreno;
- Errores sistemáticos característicos del proceso de obtención del MDE:
 - Los MDE derivados de curvas de nivel, tienen el problema de una generalización excesiva de las curvas, pueden presentar artefactos característicos como cimas planas o aterrazados;
 - Los MDE derivados de medidas sobre el terreno pueden estar sesgados hacia las altitudes de las zonas de fácil acceso;
 - Los MDE obtenidos mediante técnicas de teledetección (radar, LIDAR) tienen la ventaja de su enorme densidad de muestreo, pero en ocasiones no miden la altitud real sino esta más la altura del objeto que está sobre esta. Tienen también problemas de sombreado;
 - Los MDE derivados de la restitución de fotografía aérea muestran mayores errores en las umbrías y hacia los bordes de los fotogramas.
- Errores aleatorios inherentes a cualquier procedimiento de medición.

Un simple histograma de las elevaciones permitirá descubrir anomalías no detectables con la simple visualización, como el que los valores de las curvas de nivel aparezcan con excesiva frecuencia (resulta frecuente en interpolación a partir de curvas de nivel rasterizadas).

A continuación puede estimarse el error medio mediante un muestreo de errores. Se trata de calcular el error cometido en diversos puntos cuya altitud se ha medido en el campo y hacer un análisis estadístico de los mismos. En este sentido, el error de altitud en un punto x, y se define como la diferencia entre la altitud real y la estimada:

$$\varepsilon_{x,y} = \hat{Z}_{x,y} - Z_{x,y}$$

Si se obtiene el valor de $\varepsilon_{x,y}$ para un número de puntos de validación suficientemente alto, se obtiene una muestra de errores cuyas propiedades deseables son:

- Media y varianza próximas a cero;
- Independencia espacial, es decir que los errores no sean sistemáticamente mayores en unos sectores que en otros;

- No autocorrelación, es decir que la magnitud del error en un punto es independiente de los errores en puntos cercanos.

Un estadístico válido como aproximación global es el error cuadrático medio que se define como:

$$\bar{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_{xi,yi}^2}{N}}$$

donde N es el tamaño de la muestra de errores.

El error cuadrático medio es uno de los descriptores tradicionalmente utilizados para cuantificar los errores en un MDE. Tiene el inconveniente de que necesita valores de elevación real y que no nos informa acerca de la distribución espacial de los errores y su posible autocorrelación.

Se han desarrollado otros métodos (Felicísimo, 1994; Hengl et al., 2004) para calcular índices de error en el caso de no disponer de una superficie de referencia que tomar como verdad terreno.

Utilización de variables de terreno y redes de drenaje

Análisis estadísticos como los expuestos anteriormente, sólo permite determinar la precisión en la estimación de Z . Sin embargo para muchas de las aplicaciones ambientales (entre ellas las hidrológicas) no es tan importante la exactitud en la elevación como una correcta reproducción de formas, gradientes, direcciones de drenaje, etc. Un buen MDE debe conservar las relaciones entre las celdillas vecinas de manera que no haya alteraciones significativas en las variables obtenidas a través de operadores de vecindad, por tanto debe hacerse un **análisis de errores en los mapas derivados**.

El problema de la propagación de los errores en una capa raster a las capas raster derivadas ha sido ampliamente estudiado (Temme et al., 2009).

Si se dispone de varias capas de elevaciones, puede llevarse a cabo una **comparación** de los valores de los diferentes parámetros topográficos en las diferentes capas para determinar donde se producen las mayores diferencias y, con ayuda de las curvas de nivel, tratar de determinar porque y cual sería en cada caso la mejor opción.

El análisis de la **consistencia hidrológica** permite extender el análisis de transectos a dos dimensiones. La idea básica es que un MDE debe tener la misma respuesta hidrológica que el terreno que modeliza. Un buen ejemplo de este tipo de análisis sería verificar si se puede reconstruir correctamente la red de drenaje.

Generalmente se distingue entre variables primarias, aquellas obtenidas directamente a partir de las elevaciones; y secundarias, obtenidas como índices entre variables primarias. Una revisión reciente y completa de variables primarias puede encontrarse en Olaya (2009), mientras que Gruber y Peckman (2009) lo hacen para las variables secundarias de interés en hidrología.

Una de las variables primarias obtenidas de un MDE es la dirección de drenaje, existen diversos métodos para su cálculo siendo el más sencillo, y también el más utilizado, el algoritmo D8 o de máxima pendiente. A partir de esta información puede generarse un mapa de drenaje acumulado y, estableciendo un valor umbral de drenaje acumulado, las diferentes celdillas se clasifican en función de su inclusión o no en la red de drenaje. Lógicamente un algoritmo de interpolación será adecuado en tanto en cuanto reproduzca con mayor fidelidad la red de drenaje.

OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo es estudiar el comportamiento de MDEs obtenidos con diferentes metodologías reproduciendo las características del MDE obtenido con LIDAR que consideraremos verdad-terreno. Para ello se desarrollan los siguientes pasos:

1. Extracción de curvas de nivel con equidistancia de 5 metros a partir del MDE del LIDAR;
2. Interpolación de MDEs a partir de estas curvas utilizando diferentes procedimientos de interpolación;
3. Obtención de capas de variables derivadas a partir del MDE original y de los interpolados;

4. Análisis de los errores obtenidos para la elevación y las capas derivadas.

ÁREA DE ESTUDIO

La Sierra minera de Cartagena-La Unión está situada en el extremo SE de la Región de Murcia (figura 1) entre Cabo de Palos y la Ciudad de Cartagena, ocupando un área de aproximadamente 50 km². Pertenece al dominio geológico de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas, las cuales se caracterizan por haber sufrido la orogenia alpina con mayor intensidad y han sufrido alteraciones de bajo grado de metamorfismo (Rodríguez-Estrella, 2007). La Zona Bética Interna está formada por materiales pertenecientes a los grandes complejos tectónicos superpuestos y a terrenos neógenos y cuaternarios. Estos complejos son el Nevado-Filábride, el Apujárride y el Maláguide, aunque en la Sierra Minera solo se encuentran presentes los dos primeros.

El clima general del Campo de Cartagena es de tipo mediterráneo semiárido con escasas precipitaciones (300 mm de media anual) de carácter generalmente torrencial. La variabilidad pluviométrica tiene una marcada variabilidad estacional, típica del sureste peninsular, registrándose los valores máximos en otoño (septiembre y octubre), pudiendo alcanzar el 20% del total anual, y los mínimos en julio y agosto, representando tan sólo el 2% del total.

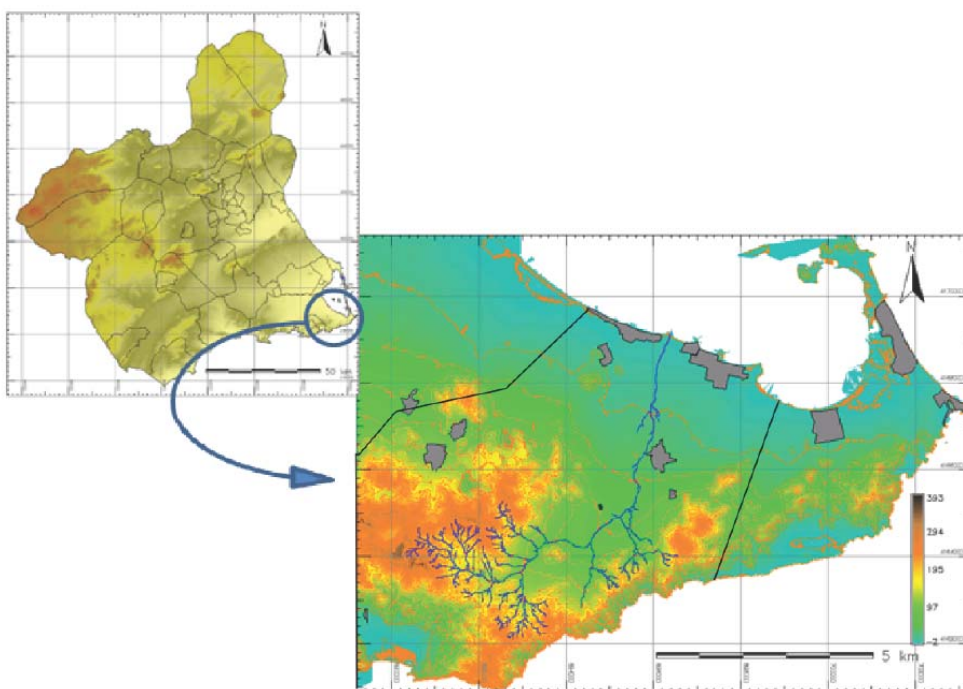


Figura 46. Localización del área de estudio

El régimen térmico se caracteriza por una marcada estacionalidad, con un verano largo y caluroso, un invierno corto y fresco y una primavera y otoño moderados. La influencia marina y el resguardo de los vientos del norte de las Sierras Béticas hacen que los contrastes térmicos sean poco acusados, suavizando las temperaturas y posibilitando veranos menos calurosos e inviernos menos fríos que en el interior de la Región de Murcia. No existen períodos de heladas continuas ni frecuentes (Conesa-García, 1990) y aunque a nivel térmico se encuentra siempre por encima del nivel exigido para el crecimiento vegetativo de las plantas, la escasez de precipitaciones, los elevados valores de evapotranspiración potencial y las reducidas disponibilidades hídricas infiltradas a lo largo del año, condicionarán la actividad vegetativa del área (López-Bermúdez y Conesa-García, 1990).

Predominan los suelos poco evolucionados, destacando por su extensión los litosoles, que aparecen en zonas de mayor pendiente donde predominan fenómenos de erosión y presentan la roca madre en la superficie. En zonas de umbría, al ser el microclima más húmedo, pueden aparecer suelos más evolucionados debido a la presencia de vegetación forestal. En las llanuras sedimentarias aparecen suelos más desarrollados, sometidos a cultivo desde

antiguo. Estos suelos, formados sobre sedimentos cuaternarios calizos, corresponden principalmente al tipo de los xerosoles, formados bajo un régimen de precipitación árido. Aún desprovistos de materia orgánica por efecto de continuas roturaciones albergan los principales cultivos de regadío de las depresiones litorales de Cartagena, Mazarrón y Águilas. Las zonas de playa, como es el caso de la desembocadura de la rambla, aparecen también suelos poco evolucionados como son los arenosoles albcos compuesto por material arenoso, escasamente compactado, sin diferenciación de horizontes y de comportamiento físico-químico muy homogéneo (Alias y Ortiz-Silla, 1975).

En estas condiciones, los sistemas de drenaje son de carácter torrencial con origen en numerosos cauces menores en las sierras (barrancos, cárcavas) que recogen las aguas de arroyada y confluyen en sistemas de drenaje reducidos por la cercanía la mar, tan sólo la Rambla de la Carrasquilla constituye un sistema de drenaje de cierta entidad. El régimen de caudales de esta rambla es el característico de las ramblas mediterráneas semiáridas. Por consiguiente, se trata de un cauce efímero donde el agua solo fluye de forma esporádica y en episodios de tormenta.

La modificación de los usos del suelo en la cuenca vertiente que ha tenido lugar durante las últimas décadas, con el aumento de la superficie urbanizada, ha ocasionado un cambio en el comportamiento de las avenidas de la rambla. El incremento de la impermeabilidad del suelo ha supuesto una menor respuesta frente a la infiltración, con aumento del caudal punta de avenida y una disminución del tiempo de concentración de dicha avenida (CHS, 2009).

Se trata de un área muy afectada por la minería a cielo abierto desde hace más de 2500 años, aunque su máximo de actividad data de 1840 y se continúa hasta inicios de la década de los noventa (Vilar y Egea-Bruno, 1994). El paisaje visible hoy día es el resultado de la extracción de mineral durante los últimos 150 años, especialmente de la actividad desarrollada en la segunda mitad del siglo XX. Se caracteriza por una inversión del relieve por la excavación de las montañas y el rellenado de las depresiones con el material movilizado, así como una proliferación de las balsas de depósitos de estériles (Romero-Díaz y García-Fernández, 2008), el material movilizado se ha estimado en un total de 360 millones de toneladas durante la segunda mitad del siglo XX (Moreno Brotóns et al., 2009).

Los procesos de modelado más importantes resultantes de las explotaciones mineras a cielo abierto (López-Bermúdez, 1987), son las siguientes:

- Desmontes y aplanamiento de relieves, realizados en la fase previa de investigación mediante sondeos, que requieren superficies planas, lo que conllevará un abancalamiento más o menos regular del relieve con taludes con grandes desniveles. Los sectores situados al Sur de El Llano del Beal y proximidades de la Esperanza, son los más afectados en este caso;
- Arranque de materiales, mediante perforación y voladura combinados con medios mecánicos, a través de bancos dispuestos en formas concéntricas, unidas por medio de rampas y pistas de transporte. El resultado morfológico de estas canteras son grandes cavidades cuya magnitud crece por ensanche y ahondamiento;
- Acumulaciones de rocas formando escombreras construidas con taludes de inclinación variable según la naturaleza de los materiales apilados.

Sobre todas estas alteraciones mineras constituidas por materiales poco consolidados en zonas de gran pendiente desprovistas de vegetación se desarrollan grandes fenómenos de erosión hídrica por arroyada. La erosión laminar arrastra los finos ladera abajo depositándolos al pie de los taludes. También se observa erosión en surcos en una red de canales paralelos sobre los depósitos. En casos más intensos el avance de estos surcos tiende hacia un abarrancamiento. Por último, cabe destacar la presencia de escombreras o vertederos mineros en zonas altas de la cabecera cercanas a la Peña del Águila, situadas en las antiguas minas de plomo, y en el Collado de Ponce, como son las balsas de lodos de flotación de El Lirio.

El resultado es una topografía muy compleja sobre la que resulta interesante estudiar el comportamiento de diferentes procedimientos de interpolación automática de Modelos Digitales de Terreno a partir de curvas de nivel.

METODOLOGÍA

A partir del Modelo Digital de Elevaciones extraído de datos LIDAR se han generado curvas de nivel con equidistancia de 5 metros. Aunque, como ya se ha mencionado, se han observado errores posicionales y altitudinales de cierta importancia en este MDE, el objetivo de este trabajo es estudiar como diferentes procedimientos de interpolación reproducen esta supuesta verdad terreno.

A pesar de estos problemas, se ha considerado que este MDE puede servir como verdad terreno para comprobar hasta que punto diferentes algoritmos de interpolación consiguen reproducir la topografía del mismo.

Los programas utilizados han sido ArcGIS y GRASS (Neteler y Mitásová, 2008) para el desarrollo de modelos, cálculo de variables derivadas y obtención de mapas de errores; R (R Development Core Team, 2009) para el análisis estadístico y la producción de gráficos a partir de los resultados y SAGA (Olaya y Conrad, 2009), a través de la librería RSAGA (Brenning, 2010) para el cálculo de algunas variables derivadas.

Los algoritmos de interpolación aplicados son:

- Interpolación lineal (módulo *r.surf.contour* de GRASS v.6.4);
- Interpolación por splines (módulo *v.surf.rst* de GRASS. En un trabajo anterior (Alonso Bernardo, 2009) se observó que se obtenían los mejores resultados utilizando un parámetro de tensión de 40 que es el aplicado en este caso;
- Red Irregular de Triángulos (extensión 3DAnalyst de ArcGIS 9.2.);
- Modelo ANUDEM (extensión SpatialAnalyst de ArcGIS 9.2.)

Alonso Bernardo (2009) ha comprobado cómo los métodos basados en medias ponderadas por inverso de la distancia dan peores resultados que los algoritmos de interpolación lineal o basados en splines, por lo que no se han incluido en este trabajo.

Dejando al margen el problema de la resolución óptima para la generación de un MDE a partir de curvas de nivel (Hengl, 2006), en este trabajo se ha utilizado la misma resolución que el MDE original, el problema se centra en la elección de un algoritmo de interpolación adecuado.

A partir de los modelos generados, así como del MDE original, se han calculado diversas variables del terreno:

- Variables primarias:
 - Pendiente (*slo*) y orientación (*asp*). En el caso de splines, TIN y ANUDEM, los propios métodos generan una estimación de estos parámetros. Para el modelo lineal se ha utilizado el módulo *r.slope.aspect* de GRASS;
 - Curvatura transversal (*tcutv*) y de perfil (*pcurv*) con el módulo *r.slope.aspect* de GRASS;
 - Rugosidad (*rug*), calculada como la suma de los valores absolutos de los residuos obtenidos tras ajustar un plano a una ventana de 3x3 entorno a cada celdilla. Este procedimiento se programó con el lenguaje de la calculadora de mapas de GRASS (módulo *r.mapcalc*).
- Variables secundarias:
 - Índice Topográfico de Humedad (*twi*), calculado con SAGA;
 - Índice LS (*ls*), calculado con SAGA;
 - Insolación (*insol*), calculada con el módulo *r.sun* de GRASS como el ángulo de insolación el día 1 de enero a las 12 (hora solar).
- Red de drenaje. Tras realizar algunas pruebas se observó que con un valor umbral de área drenada de 500 celdillas se obtenían las redes de drenaje más realistas para el MDE original. Por tanto se ha utilizado el mismo umbral para extraer redes de drenaje para todos los modelos.

Análisis de los errores

Para cada una de estas variables y cada uno de los modelos de interpolación se generó una capa de errores, los estadísticos utilizados para realizar la comparación han sido los siguientes:

- Error mínimo;
- Primer cuartil de los errores;
- Error medio;

- Tercer cuartil de los errores;
- Error máximo;
- Error cuadrático medio;
- Proporción de celdillas por encima de un determinado error umbral.

El cálculo del tanto por ciento de celdillas con error por encima de un valor umbral, permite determinar que algoritmos producen valores anómalos con mayor frecuencia. En todos los casos se ha utilizado como referencia los valores de error por encima de los cuales sólo aparece el 1 % y 0.1 % de las celdillas en el caso de la interpolación por splines. La única excepción ha sido la orientación para la que se han utilizado umbrales de 45 y 90 grados por ser considerados más significativos.

Un primer análisis de los resultados mostró que el modelo de interpolación lineal era el que peor se comportaba de los cuatro. Esto dejaba tres modelos lo que permitió crear mapas de distribución de la mejor interpolación. Se trata de combinaciones RGB en las que los errores de cada uno de los tres modelos restantes se reescalan a valores entre 0 y 255. De este modo las zonas blancas representarían zonas con un error reducido para los tres métodos, las negras errores grandes para los tres métodos, etc. Estos mapas permiten también detectar la presencia de correlación en los errores.

Para cuantificar los errores en la ubicación de la red de drenaje, se ha utilizado un método desarrollado en Alonso Bernardo (2009), basado en los siguientes pasos:

1. Cálculo de las distancias a la red de drenaje real;
2. Cálculo de las distancias a la red de drenaje simulada;
3. Suma de las distancias, para cada celdilla de la red real, a la celdilla más cercana de la red simulada. Valores elevados indicarían que la red simulada a creado cauces alejados de los reales, pudiéndose interpretar así como un error de comisión;
4. Suma de las distancias, para cada celdilla de la red simulada, a la celdilla más cercana de la red real. Valores elevados indicarían que algunos de los cauces de la red real no han sido simulados adecuadamente, pudiéndose interpretar así como un error de omisión.

La figura 2 muestra como ambos errores no están necesariamente relacionados. En la tabla 1 aparecen los estadísticos resumen del error de omisión (*eom*) y error de comisión (*eco*)

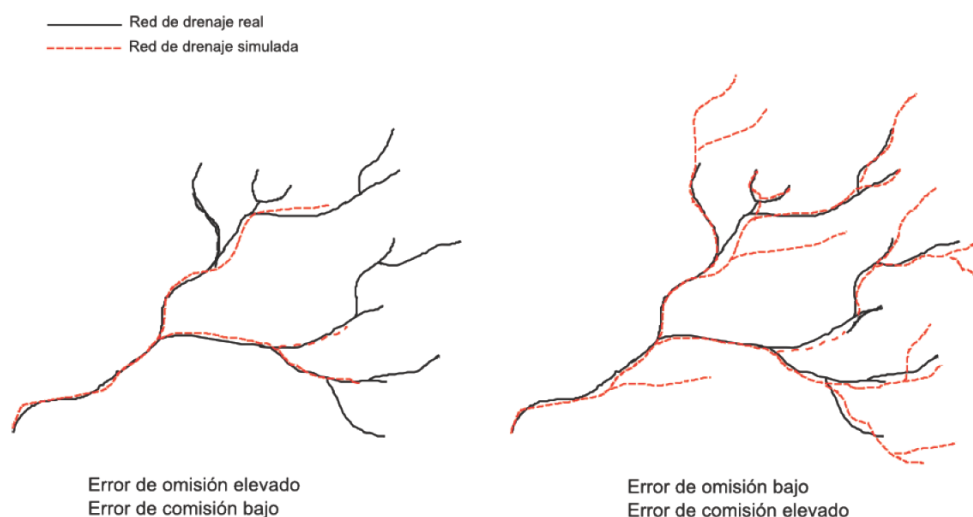


Figura 2. Error en la ubicación de la red de drenaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 aparece un resumen de los resultados obtenidos, la tabla 1 muestra los umbrales escogidos para comparar la frecuencia de valores muy anómalos. La figura 3 muestra, como ejemplo, la distribución de errores obtenidas con la elevación, la orientación, la insolación y el índice topográfico de humedad.

En general estos gráficos muestran como los resultados son muy inesgados con dos excepciones. El modelo lineal que produce sesgos de cierta importancia (ver también tabla 2) en algunas de las variables. De las variables secundarias analizadas, el índice topográfico de humedad y el factor LS muestran patrones de distribución de errores más complejos para todos los modelos. Este hecho parece deberse a que la propagación de errores da lugar a mayores dispersiones en los valores. En general se observa un comportamiento similar para los modelos TIN y ANUDEM, siendo peores splines y el modelo lineal.

En el caso de la elevación los mejores resultados se observan con el modelo TIN y los peores con el modelo lineal en el que se observa un primer cuartil significativamente más reducido. La figura 4 muestra la distribución espacial de los errores. Se observa como el modelo lineal tiende a infraestimar la elevación en casi todo el área sobreestimándola en las zonas costeras de pendiente suave, especialmente en la bahía de Portmán al sudoeste del área. y a generar formas abancaladas. El modelo TIN presenta un comportamiento similar en la bahía de Portman (suroeste del área de estudio), al ser una formación cóncava de cierta extensión, los modelos lineales tienden a sobreestimar la elevación, curiosamente ocurre lo contrario en el modelo ANUDEM (se infraestima la elevación).

En las zonas de topografía más abrupta el patrón de errores de los modelos TIN y ANUDEM tiende a reproducir aquella. En todos los casos la zona de contacto entre el cauce principal y la Rambla de la Carrasquilla muestra un patrón similar de errores infraestimando la elevación de las celdillas cercanas al cauce salvo en el cruce con las curvas de nivel; lo que implica también una infraestimación de la pendiente de las orillas del cauce.

Para la pendiente el algoritmo lineal genera un valor relativamente más alto que el resto en el tercer cuartil (sobreestimación de pendientes) que se refleja en la distribución de errores (figura 3). Se observa una sucesión de bandas de pendiente sobreestimada e infraestimada a uno y otro lado de las curvas de nivel. Por otra parte todos los modelos presentan pendientes menores que las reales en las orillas de los cauces.

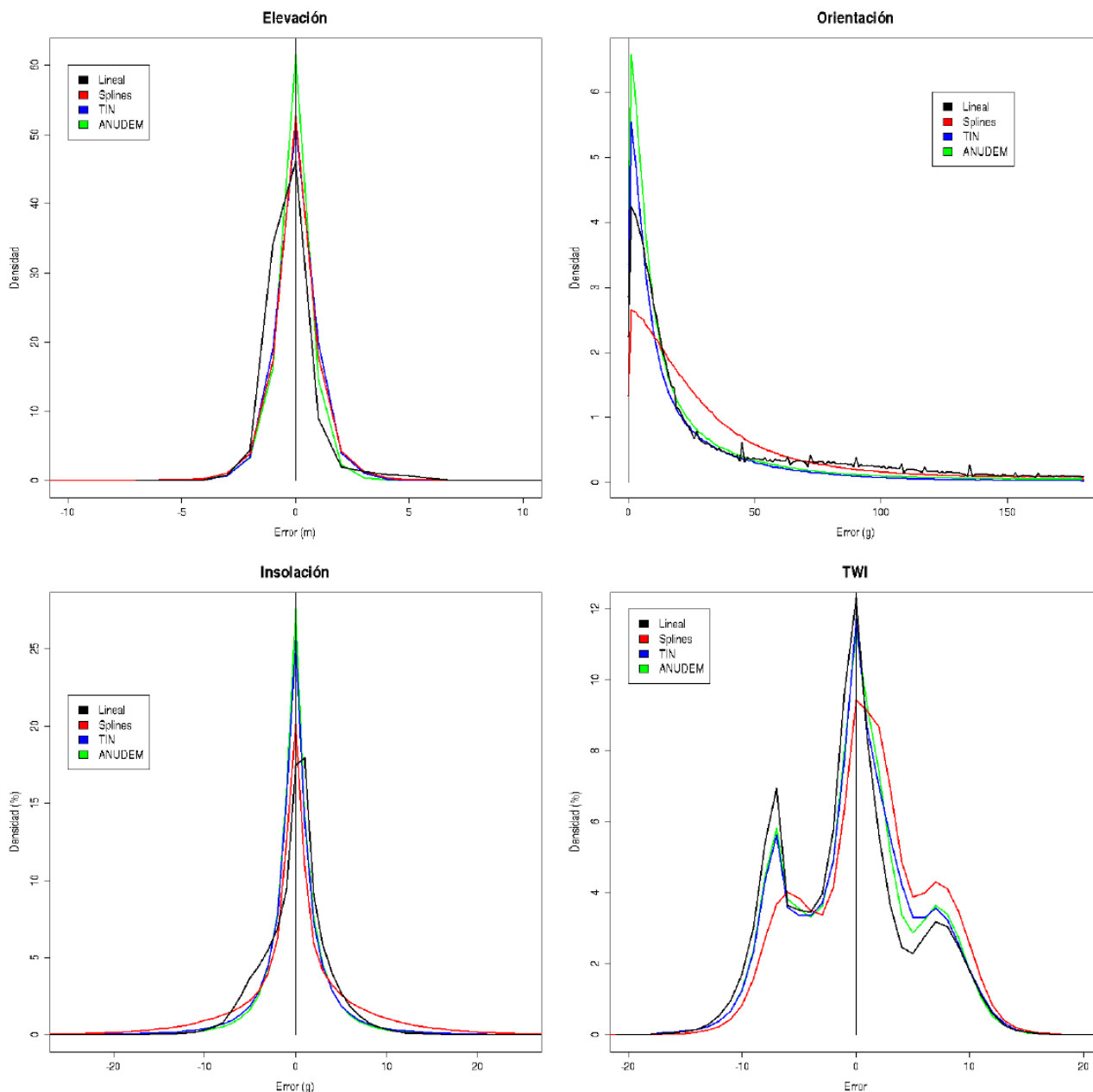


Figura 3. Distribución de errores para cuatro de las variables analizadas.

Aparece una sobrevaloración de la pendiente en algunas zonas llanas que suponen rupturas de ladera, ligadas a caminos o a balsas de estériles mineros. Los valores anómalos de pendiente son relativamente más importantes en el modelo de splines debido a la presencia de overshootings, este modelo muestra también en el mapa de errores de la pendiente artefactos lineales que indican errores debido a la segmentación que utiliza el modelo.

En la orientación el modelo de splines y el lineal son significativamente peores, funcionando el modelo TIN ligeramente mejor que ANUDEM. Llama la atención el elevado porcentaje de celdillas con errores superiores a 45° y 90°, estos errores aparecen en zonas de baja pendiente en los que la orientación queda en muchos casos indeterminada.

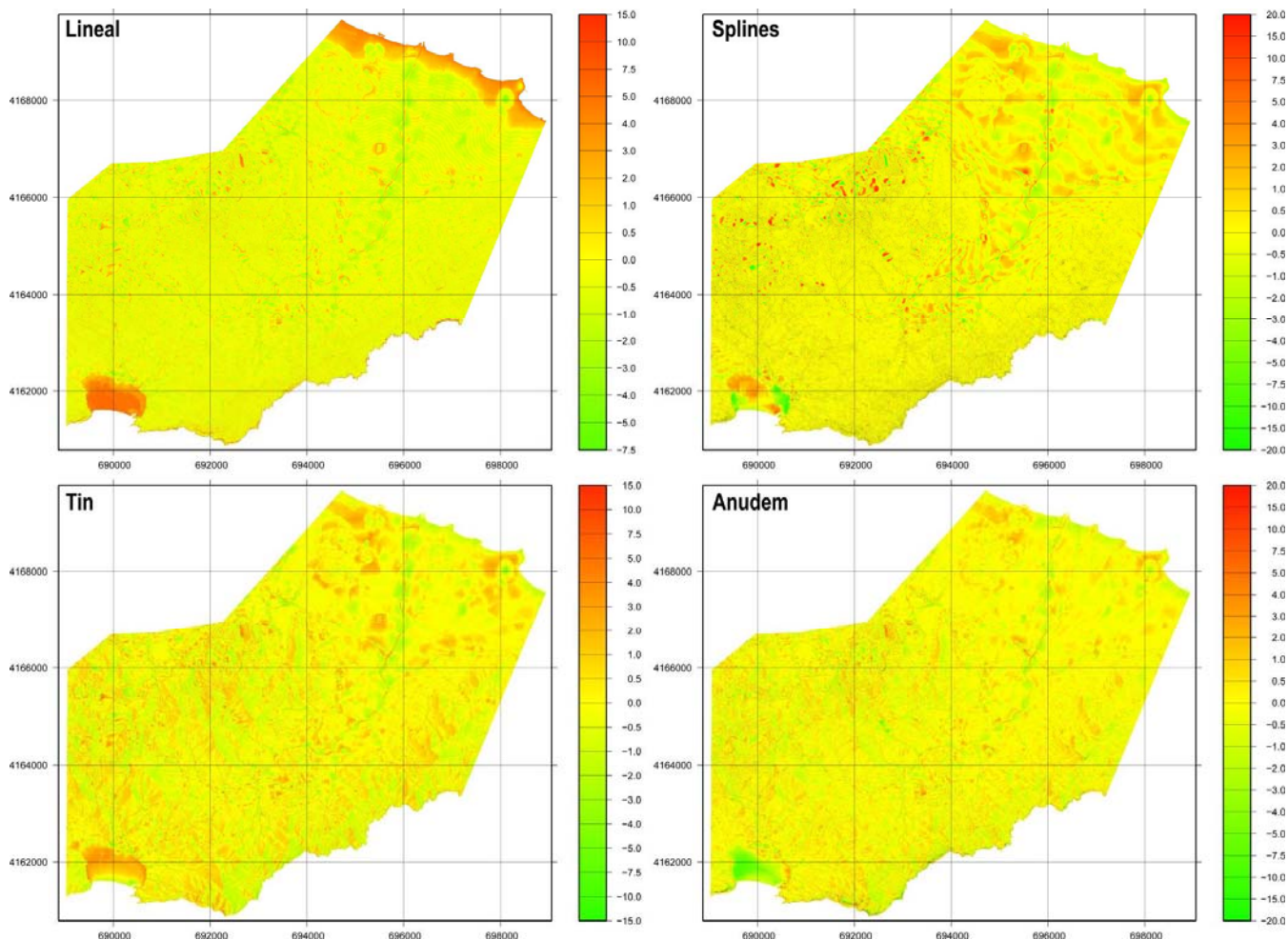


Figura 4. Distribución de errores de la elevación.

En el caso de las curvaturas y la rugosidad, los mejores resultados se consiguen con ANUDEM seguido de TIN y splines. Para la curvatura el modelo lineal vuelve a generar artefactos ligados a las curvas de nivel mientras que el algoritmo de splines refleja el problema de la segmentación. El modelo lineal genera unos valores de rugosidad considerablemente más sesgados que los demás. Tanto rugosidad como curvaturas muestran de nuevo una relación entre los errores y la red de drenaje.

A la hora de modelizar la insolación, los splines se comportan bastante peor que los demás métodos, produciendo resultados más sesgados y con un mayor error cuadrático medio. Los errores son mayores (para todos los algoritmos de interpolación) en las zonas de topografía compleja. El modelo lineal finalmente muestra también para esta variable artefactos ligados a la disposición de las curvas de nivel.

Como ya se ha mencionado, otras variables secundarias como el índice de convergencia topográfica o el factor LS presentan patrones más complejos (figura 3) acumulándose en todos los casos los errores positivos en zonas de piedemonte. La completa comprensión de esta distribución va a requerir estudios con más detalle.

Para la generación de redes de drenaje (figura 5), el mejor modelo es ANUDEM seguido de TIN y splines con valores similares, si bien splines presenta mayores valores extremos en los errores de omisión y comisión. Se observa como el error de omisión es considerablemente mayor que el de comisión en todos los casos, esto se debe a que todos los MDE interpolados son más suaves y concentran menos la escorrentía, por tanto los cauces más pequeños de orden menor no pueden simularse correctamente

Tabla1. Estadísticos de los errores.

Variable	Modelo	Mínimo	Cuar.1	Media	Cuart.3	Máximo	ECM	abs(e)>k1	abs(e)>k2
mde	splines	-18.1	-0.45	0.02	0.48	18.30	1.39	1	0.100
	lineal	-7.2	-0.75	-0.19	0.13	15.00	1.36	1.363	0.002
	tin	-14.4	-0.45	0.04	0.51	11.7	0.86	0.096	0.001
	anudem	-25.6	-0.39	-0.08	0.32	21.05	0.93	0.655	0.025
slo	splines	-46.7	-2.98	-0.57	1.12	59	22	1	0.100
	lineal	-43.5	-2.36	-0.56	1.82	38	18	0.339	0.032
	tin	-47.0	-1.68	-0.84	0.74	32	15	0.495	0.048
	anudem	-42.2	-1.62	-0.58	0.92	46	14	0.372	0.025
asp	splines	0	9.8	36.6	48.2	180	2838	27.09	10.42
	lineal	0	6.0	36.6	56.0	180	3229	28.75	14.12
	tin	0	4.0	23.4	28.7	180	1558	13.25	4.53
	anudem	0	4.0	24.8	29.5	180	1805	16.77	6.76
pcurv	splines	-0.69	-0.0081	0.000001 2	0.0084	0.39	0.0008 4	1	0.100
	lineal	-0.63	-0.0220	- 0.000004 7	0.0200	0.41	0.0015 0	1.032	0.070
	tin	-0.57	-0.0067	0.000006 4	0.0071	0.48	0.0005 6	0.4611	0.034
	anudem	-0.66	-0.0067	0.000005 3	0.0070	0.43	0.0004 9	0.3563	0.023
tcurv	splines	-0.59	-0.007	-0.0001	0.006	0.53	0.0006 7	1	0.100
	lineal	-0.56	-0.012	-0.0000	0.011	0.56	0.0013 0	2.281	0.109
	tin	-0.67	-0.006	-0.0000	0.006	0.58	0.0003 3	0.269	0.026
	anudem	-0.60	-0.006	-0.0000	0.006	0.62	0.0003 7	0.312	0.035
rug	splines	-13.3	-0.26	-0.140	0.040	26	0.260	1	0.1
	lineal	-7.1	-0.53	-0.320	-0.066	3.5	0.260	0.1391	0.001642
	tin	-5.7	-0.11	-0.063	0.034	3.3	0.058	0.03742	0.000447 6
	anudem	-12	-0.11	-0.059	0.041	3.7	0.077	0.2007	0.0199
twi	splines	-25	-2.4	1.100	4.7	26	30	1	0.1
	lineal	-21	-4.9	-0.650	2.3	24	31	1.419	0.1543
	tin	-26	-3.7	0.057	3.5	25	30	1.377	0.1847
	anudem	-24	-4	-0.074	3.1	25	30	1.318	0.1829
ls	splines	-2303	-4.4	5.8	18	2175	7149	1	0.09995
	lineal	-2303	-12	-9.9	1.9	2283	4638	0.6576	0.05943
	tin	-2303	-7.9	1.6	16	2136	5871	0.8471	0.08206
	anudem	-2303	-3.8	4.5	15	2261	5589	0.9444	0.06468

Variable	Modelo	Mínimo	Cuar.1	Media	Cuart.3	Máximo	ECM	abs(e)>k1	abs(e)>k2
insol	splines	-61.98	-1.734	0.26540	2.217	69.88	41.51	0.99999	0.099972
	lineal	-50.35	-1.795	0.01872	1.736	57.94	13.56	0.03740	0.002858
	tin	-72.01	-1.290	-0.01925	1.252	61.94	17.09	0.27247	0.027538
	anudem	-51.80	-1.137	0.07836	1.205	69.80	11.10	0.05999	0.005751
eom	splines	0	4	20	29	164	902	1.013	0.1303
	lineal	0	4	24	35	262	1535	3.328	1.296
	tin	0	4	20	28	224	1002	1.654	0.4592
	anudem	0	4	18	25	214	860	1.081	0.2735
eco	splines	0	4	13	16	134	392	1.047	0.1035
	lineal	0	4	13	17	138	391	1.159	0.0538
	tin	0	4	13	18	105	377	0.8608	0.004139
	anudem	0	4	11	14	145	351	0.7698	0.1821

Tabla2. Umbrales dentro de los que están el 99% y el 99.9% de los errores con el método de splines.

Umbral	mde	slo	asp	pcurv	tcurv	rug	insol	twi	ls	eom	eco
u1	-10.58	-27.13		-0.172	-0.164	-4.48	-32.14	-16.04	-1143		
u2	-4.19	-18.92		-0.109	-0.098	-2.038	-22.23	-11.71	-319		
u3	4.16	16.77	45	0.112	0.106	1.15	23.5	13.49	298	101	68
u4	9.43	26.89	90	0.160	0.182	2,42	34.62	17.35	1332	132	104

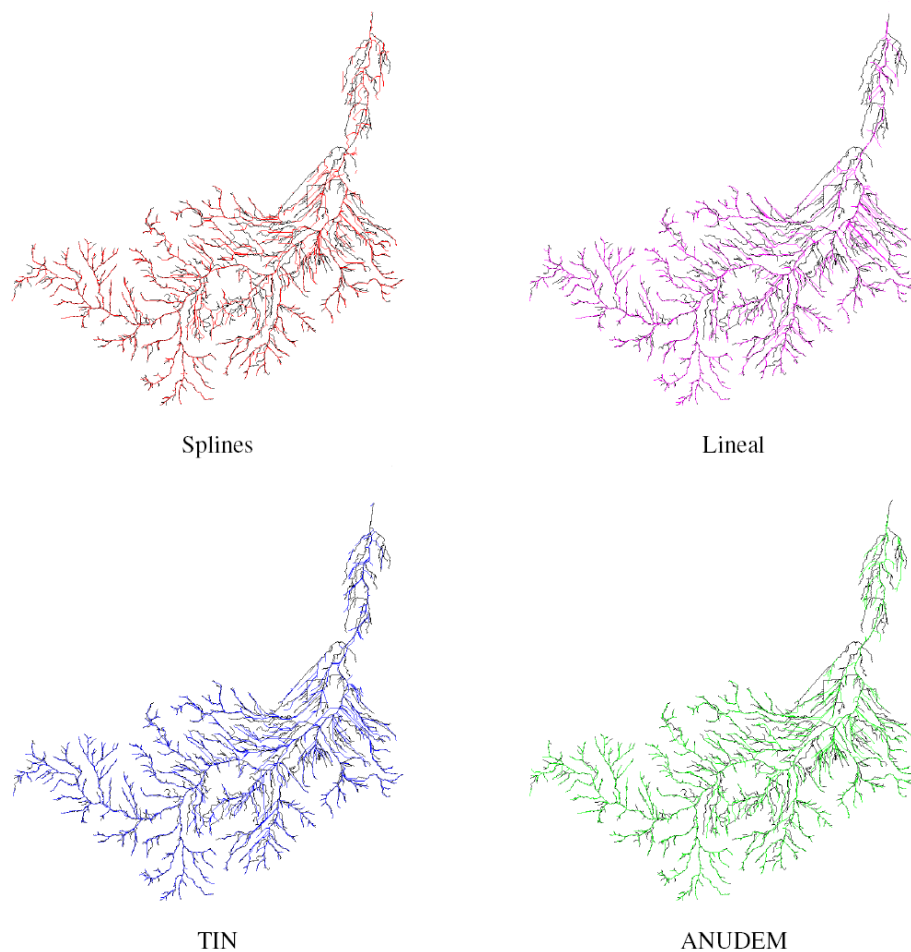


Figura 5. Redes de drenaje obtenidas del LIDAR (en negro) y simuladas con los cuatro algoritmos analizados.

CONCLUSIONES

Aunque los resultados de este estudio no han sido aún totalmente analizados, pueden establecerse ya una serie de conclusiones preliminares:

- ✓ Los mejores resultados parecen obtenerse con los algoritmos TIN y ANUDEM, los resultados son diferentes según la variable y el indicador de error que se tenga en cuenta;
- ✓ Se han observado peores resultados con las variables secundarias debido a la propagación de errores. El número de valores anómalos resulta especialmente alto con el algoritmo de splines, posiblemente debido al efecto de sobrepasamiento;
- ✓ La distribución de errores parece seguir patrones espaciales debido a la mayor o menor habilidad de los algoritmos estudiados para reproducir formas concretas.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación denominado “Modelización Hidrológica en Zonas Semiáridas, Subproyecto Modelización Numérica de Procesos Hidrológicos y Sistemas de Recursos Hídricos”, financiado por la Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua (IEA), gracias al cual ha sido posible su consecución.

Asimismo, los autores expresan su más profundo agradecimiento por la ayuda dada en la disponibilidad de los datos por parte del Sistema de Información Geográfica y Ambiental de la D.G. de Patrimonio Natural y Biodiversidad (Consejería de Agricultura y Agua de la CARM).

REFERENCIAS

- Alias, L.J. y Ortiz-Silla, R. (1975): Características fisiográficas y ambientales de interés edafogenético del Campo de Cartagena (Murcia). *Anal. Inst. Bot. Cavanilles*, 32 (2): 1021–1037.
- Alonso-Bernardo, D. (2009): *Utilización de un MDE obtenido de datos LIDAR para validar Modelos Digitales de Terreno generados mediante interpolación*. Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Murcia.
- Baltsavias, E. (1999): A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54:83-94.
- Brenning, A. (2010): RSAGA: SAGA Geoprocessing and Terrain Analysis in R. R package version 0.9-6. <http://CRAN.R-project.org/package=RSAGA>.
- CHS (2009). *Valoración del estado ambiental de la Rambla de la Carrasquilla*. CHS, Murcia. 50 pp. http://www.chsegura.es/export/descargas/cuenca/restauracionderios/lacarrasquilla/docsdescarga/VEA_Carrasquilla.pdf.
- Conesa-García, C. (1990): *El Campo de Cartagena. Clima e Hidrología de un Medio Semiárido*. Universidad de Murcia, Murcia. 450 pp.
- DGMN (2008): *Adquisición y tratamiento de una imagen multiespectral de alta resolución para la evaluación de los recursos naturales de la Región de Murcia*. Informe científico-técnico, DGMN, Cons. de Agricultura y Agua de la CARM.
- Felcísimo, A. M. (1994): Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(4): 29–33. <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/SIG/ISPRS94.html>
- FOGG, D.A. (1984): Contour to rectangular grid conversion using minimum curvature. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(1): 85–91.

- Hengl, T. (2006): Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32:1283–1298.
- Hengl, T.; Bajat, B.T.; Reuter, H.I. y Blagojevic, D. (2008): Geostatistical modelling of topography using auxiliary maps. *Computers & Geosciences*, 34(12): 1886-1899
- Hengl, T.; Gruber, S. y Shrestha, D.P. (2004): Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5 (2):97–112.
- Hodgson, M., Jensen, J., Rabber, G., Tullis, J., Davis, B., Thompson, G., Schuckman, K. (2005): An evaluation of LIDAR derived elevation and terrain slope in leaf-off conditions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71:817-823.
- Hutchinson, M.F. (1996): A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. National Center for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara.
- Li, Z.; Zhu, Q. y Gold, C. (2005): *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 319 pp.
- Liu, X, Zhang, Z., Peterson, J. y Chandra, S. (2007): LIDAR-Derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *Geoinformática*, 11:37-53.
- López-Bermúdez, F. y Conesa-García, C. (1990): Características granulométricas de los depósitos aluviales en el Campo de Cartagena. *Cuadernos de investigación geográfica*, 16:31–54.
- López-Bermúdez, F. (1987): Morfología derivada de la minería a cielo abierto en la Sierra de Cartagena. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 7:133–144.
- Mitášová, H. y Hofierka, J. (1993): Interpolation by regularized spline with tension, II Application to terrain modelling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25:657–669.
- Moreno Brotóns, J.; Romero-Díaz, A.; Alonso-Sarría, F. y Belmonte-Serrato, F. (2009): Wind erosion on mining waste in Southeast Spain. *Land Degradation & Development*, 21(2):196–209.
- Nelson, A.; Reuter, H.I. y Gessler, P. (2009): DEM Production methods and sources». En: Tomislav Hengl y Hannes I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 65-85.
- Neteler, M. y Mitášová, H. (2008): *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. 3a Edición..* Springer, New York, 406 pp.
- Olaya, V. (2009): Basic land surface parameters. En: Tomislav Hengl y Hannes I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 141-170.
- Olaya, V. y Conrad, O. (2009): Geomorphometry in SAGA. En: Tomislav Hengl y Hannes I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 293-308.

- R Development Core Team (2009): *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- Reuter, H.I.; Hengl, T.; Gessler, P. y Soille, P. (2009): Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. En: Tomislav Hengl y Hannes I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 87-120.
- Rodríguez-Estrella, T. (2007): La Geología. En: A. Romero Díaz y F. Alonso Sarría (Eds.), *Atlas Global de la Región de Murcia*. Ed. La Verdad -CMM S.A., Murcia.
- Romero-Díaz, A.; Alonso-Sarría, F.; Moreno-Brotóns, J.; Belmonte-Serrato, F. y García-fernández, G. (2009): *Evaluación de la producción de escorrentía como agente de erosión de depósitos de residuos mineros en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión: parte II. Utilización del sensor LIDAR para la generación de capas de información espacial con aplicación en la modelización hidrológica*. Informe científico-técnico. Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- Romero-Díaz, A. y García-Fernández, G. (2008): Contaminación por erosión eólica e hídrica de las áreas limítrofes a la antigua zona minera de La Unión-Cartagena. *Revista Murciana de Antropología*, 46: 235-249.
- Temme, A.J.A.M.; Heuvelink, G.B.M.; Schoorl, J.M. Y Claessens, L. (2009): «Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry». En: Tomislav Hengl y Hannes I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 497-525
- Vilar, J.B. y Egea-Bruno, P. (1994): Minería y ecología en la Sierra minera de Cartagena-La Unión. Areas: *Revista de Ciencias Sociales*, 16:235-249.
- Wise, S. (2000): Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological processes*, 19: 1909-1929.