

Este documento contiene una impresión mejorada del artículo de investigación publicado en la referencia proporcionada a continuación. Utilice, por favor, dicha referencia para citar el trabajo. La implementación del método IsoMDE está disponible en el módulo IsoMDE del software gratuito MiraMon < https://www.miramon.cat/Index_spa.htm >. Puede citar el software utilizando la referencia proporcionada en la página principal de MiraMon. La documentación del módulo IsoMDE está disponible en < <https://www.miramon.cat/help/spa/msa/IsoMDE.htm> >.

Pons X, Dalmases C, Pesquer L, Marcer A, Masó J (2004) ISOMDE: Una nueva aproximación a la generación de Modelos Digitales del Terreno. Conesa C, Martínez Guevara JB. Territorio y Medio Ambiente. Métodos cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica, p. 27-38 (367 p). Asociación Española de Teledetección y Universidad de Extremadura, Cáceres. https://www.um.es/congresoMCSIGT/XI_Congreso_del_GMCSIGT_Tomo_I.pdf. XI Congreso de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Asociación de Geógrafos Españoles (AGE), Murcia.

ISOMDE: UNA NUEVA APROXIMACIÓN A LA GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.

X. Pons^{1,2}, C. Dalmases², L. Pesquer², A. Marcer², J. Masó²

(1) Departament de Geografia, Fac. Lletres UAB, Edifici B, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra. (Xavier.Pons@uab.es)

(2) Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), Edifici C, Univ. Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra.

RESUMEN

Muchas aplicaciones territoriales de los SIG necesitan disponer de modelos digitales del terreno (MDT), como por ejemplo modelos de elevaciones, de variables climáticas, etc. Si bien es cierto que en muchos casos se dispone de dichos modelos, particularmente en la forma común de MDT ráster, en otros casos ello no es así, y la información de la variable continua sobre el territorio se presenta bajo otros modelos menos adecuados, en particular en forma de isolíneas (isohipsas, isotermas, etc). Cuando ésta es la situación de partida, la obtención del MDT no es un proceso trivial puesto que las isolíneas presentan unas características geoestadísticas especiales. Adicionalmente, no deben desecharse las otras fuentes complementarias de información altimétrica o morfológica en el proceso de la construcción del MDT, aunque el volumen de datos pueda parecer despreciable frente al de las isolíneas.

En este trabajo se presenta un método de obtención de MDT ráster a partir de las diferentes fuentes de qué se disponga: isolíneas, líneas 2D y 3D que representen zonas de ruptura (vaguadas, ríos y líneas de cresta), zonas poligonales con valor constante (lagos en el caso topográfico), datos puntuales, zonas sin datos (nodata), objetos enteramente 3D (carreteras), etc. El método implementado no es un único algoritmo, sino un conjunto de procedimientos seleccionados heurísticamente. A diferencia de otras aproximaciones, la presentada aquí realiza un análisis geométrico enteramente vectorial, utiliza diferentes ponderaciones y tipos de funciones (valores constantes, funciones lineales, funciones cúbicas, etc) según el entorno en cada punto del territorio y acude a consideraciones topológicas cuando parece necesario.

El método ha sido paulatinamente refinado y aplicado a diferentes casos y ámbitos: Andorra, Península Ibérica, la Garrotxa, etc) con resultados altamente satisfactorios (por ejemplo un test independiente con 73343 cotas reveló que el MDE de la comarca de la Garrotxa, de resolución 2.5 m, presenta un error inferior a 1.04 m en el 68% de los puntos).

Palabras Clave: MDT, MDE, interpolación espacial.

ABSTRACT

Many spatial applications require the use of Digital Terrain Models (DTM) of variables such as elevation, climate, etc. Although there often exists such models in the form of a raster DTM, in some cases the only terrain model that is available is in the form of less adequate models such as isolines (contour lines, isotherms, etc.). When such is

the case it is not a trivial process to obtain a MDT since isolines present some special geostatistical properties. Additionally, other complementary data sources of height and morphology information should not be discarded in the process of DTM generation, despite the fact that their data size makes them seem of less importance.

This work presents a methodology for obtaining raster DTMs which makes use of the different datasets available: isolines, 2D and 3D breaklines, polygonal zones with constant value (e.g. lakes), point data, nodata zones, 3D objects (e.g., roads), etc. The implemented methodology is not a single algorithm but a set of heuristically selected procedures. As opposed to other methodologies, in order to generate the DTM this proposal performs a totally vectorial geometrical analysis, uses different weighed procedures and function types (constant values, linear functions, cubic functions, etc.) depending on the vicinity of each point in the territory and topological considerations are also used when necessary.

This methodology has been continuously refined and applied to several scenarios (la Garrotxa, Andorra, Iberian Peninsula, etc.) with a high degree of success (for instance, in la Garrotxa county, an independent test of 73343 elevation points detected 1.04 m error in 68% of points for a 2.5 m resolution of the DTM).

Key Words: DTM, DEM, spatial interpolation.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la distribución espacial de variables con variación continua sobre el territorio, como por ejemplo la altitud o la precipitación, es de capital importancia en muchos estudios básicos y aplicados. Aun cuando, merced a las técnicas de teledetección, cada vez es más frecuente disponer de buenos modelos de estas distribuciones, en muchos ámbitos todavía es frecuente que la única (o la mejor) fuente de información de la que se dispone sea en forma de líneas de valor constante (isolíneas). Aun así, el conocimiento del valor en un punto cualquiera, la interpolación a partir de las isolíneas, no es un proceso trivial, puesto que los datos presentan unas características geoestadísticas espaciales: gran redundancia a lo largo de las propias isolíneas (muchos objetos con el mismo valor), que contrasta con amplias zonas sin datos (en las zonas «planas», con muy pocas isolíneas). Por otro lado, el enorme volumen de datos del que se dispone hace que las isolíneas sean una fuente no negligible ni simplificable de datos y que se hayan propuesto varios métodos para su interpolación

Tradicionalmente, la mayor parte de información altimétrica (ya particularizando sobre la variable altitud) que se incorpora a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se origina a partir de las curvas de nivel de las bases topográficas. Adicionalmente existen otras fuentes de información altimétrica: cotas, vértices geodésicos, líneas de cresta y de vaguada, carreteras 3D, etc.; que deben servir para ajustar el modelo en zonas singulares (extensiones casi planas, máximos y mínimos locales), enriquecer determinados perfiles, verificar la calidad y coherencia del modelo, etc., pero, si las curvas son fiables, precisas y detalladas, éstas deben jugar un papel fundamental en la generación del correspondiente Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y no delegarles un simple papel de suministro masivo de puntos con información altimétrica. Además, es importante que el procedimiento de interpolación tenga en cuenta no sólo elementos geométricos, sino también las características topológicas de los objetos que intervienen, a menudo olvidadas.

En la actualidad están empezando a proliferar MDE cuyo origen es directamente (o traducible de forma elemental a) un modelo ráster. Sin embargo, de momento su resolución está todavía lejos de la alcanzada por los modelos clásicos; por ejemplo el proyecto Shuttle Radar Topography Mission *SRTM* (2000) presenta una resolución a 90 m y en cambio, un topográfico 1:5000 puede dar lugar fácilmente a resoluciones de 5 m o incluso menores (2.5m); en otros casos los datos no son accesibles al “gran público SIG” por sus elevados costes (LIDAR) comparados con los costes necesarios para implementar la metodología que se presenta en este trabajo

Tampoco ha quedado remplazado el modelo digital matricial (ráster) como el que mejor se adapta a los usos derivados del MDE que se realizan dentro de las distintas aplicaciones SIG en los variados ámbitos de estudio. En efecto, el modelo ráster sigue siendo habitualmente el más

funcional para cualquier análisis y modelización donde exista una dependencia espacial de la variable altitud topográfica.

Quedando justificada la actualidad de las fuentes clásicas de información altimétrica y de la utilidad y versatilidad del modelo ráster como representación del relieve, parece totalmente adecuado revisar y actualizar los procedimientos de generación del MDE a partir de isolíneas, aprovechando mejor las actuales prestaciones de los ordenadores, junto con la experiencia y evolución de los modelos anteriores.

En este trabajo se presenta un método de generación de MDE rásters, que a partir de información altimétrica de distinta naturaleza, basado fundamentalmente en isolíneas, pero que también considere múltiples aspectos morfológicos, geométricos y topológicos durante las distintas fases de incorporación de datos, interpolación y verificación de la coherencia y calidad del modelo.

Aunque el método que se propone en esta comunicación está especializado en la generación de un MDE a partir de datos altimétricos, puede usarse sin ningún tipo de restricción para cualquier otra variable de la que se disponga de líneas de valor constante como, por ejemplo, modelos digitales de temperatura a partir de isotermas.

Durante el siguiente desarrollo se analizará en primer lugar las distintas fuentes de información posibles: naturaleza, formato y funcionalidad; en segundo lugar se explicará el procedimiento de interpolación; en tercer lugar se detallarán algunos de los mecanismos complementarios usados para el test de coherencia de las fuentes de información, el cálculo de un RMS que determine un valor objetivo de la calidad de modelo y algunos métodos complementarios para obtener una mayor continuidad entre modelos generados a partir de series cartográficas y para revisar la coherencia entre todo el conjunto de bases cartográficas usadas. Finalmente se resumirán los resultados de dos aplicaciones prácticas generadas con estas metodologías: MDE de Andorra y MDE de la comarca de la Garrotxa.

FUENTES DE INFORMACIÓN ALTIMÉTRICA

Como ya se anticipaba en la introducción, la fuente fundamental de información altimétrica (o de la variable a interpolar) deben ser las curvas de nivel (o isolíneas). En la implementación concreta realizada, las curvas de nivel a usar deben estar fusionadas en un único fichero y este debe de ser un fichero vectorial estructurado de MiraMon *Pons* (2000), en formato binario ARC. Este fichero puede ser 3D, (cada vértice dispone de coordenadas XYZ, generalmente importado desde un formato CAD), o puede ser 2D y entonces debe existir un campo en la base de datos con la correspondiente altitud para cada entidad gráfica.

El parámetro equidistancia, que define la diferencia de altitud entre dos curvas consecutivas, acotará en primer lugar la exactitud altimétrica de un modelo válido generado y además se usará como aquel valor que acote las zonas donde se aplican interpolaciones no lineales.

Aunque no es imprescindible, para la obtención de un modelo de elevada calidad, es importante que las curvas sean topológicamente correctas, no tengan intersecciones entre ellas, se depuren discontinuidades y se disponga de todas las curvas que marca la equidistancia definida (no existan vacíos en los distintos niveles altimétricos).

Como fuentes de información adicional, pueden usarse líneas de cresta y/o de vaguada. Éstas se usarán para ajustar los mínimos y máximos locales, o si corresponden a objetos 3D, para añadir información altimétrica a los perfiles generados (en el apartado de interpolación se detallará cómo). También pueden añadirse otras entidades lineales 3D, por ejemplo carreteras, con el mismo objetivo, enriquecer los perfiles, sin que en este caso obliguen a mínimo o máximo. Es importante verificar que esta información es coherente con las curvas de nivel, por ejemplo que la coordenada de cada vértice tenga un valor comprendido entre las curvas de nivel vecinas más

próximas. En la implementación concreta realizada, toda esta información debe estar en capas vectoriales separadas.

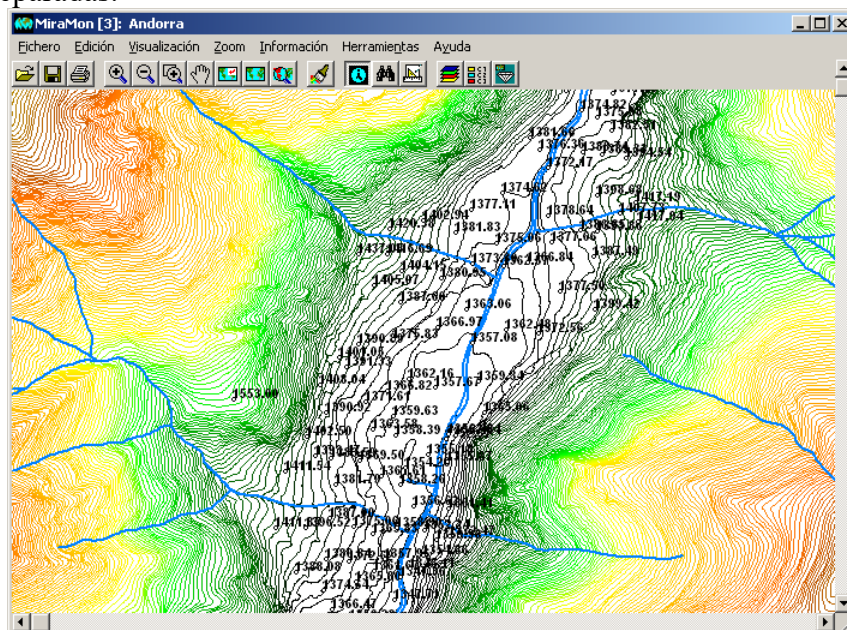


Figura 1. Fuentes de información altimétrica de un mapa topográfico 1:5000 de Andorra

Otro tipo de información que es posible incorporar son las zonas de altitud constante (por ejemplo lagos) como ficheros vectoriales estructurados de polígonos (en formato binario POL de MiraMon en la implementación realizada) En este caso no será una información relevante para la interpolación, ya que simplemente allana el terreno en estas zonas predefinidas.

Como fuente adicional, se está desarrollando la incorporación al proceso de cotas en máximos y mínimos locales, para ajustar con mayor precisión estas zonas singulares. Hasta el momento, en las aplicaciones ya implementadas, se usaron las cotas de todo el ámbito de estudio para valorar el error del modelo ajustado (ver el apartado de validación del modelo).

IsoMDE: Modelos Digitales del Terreno a partir de isolíneas

MiraMon ©
© Xavier Pons

Fichero isolíneas:

☒ Usar cota 3D

☐ Campo con las cotas: Equidistancia:

☐ Fichero de vaguadas

☒ Usar cota 3D

☐ Z es un mínimo local en la vaguada

☐ Fichero de crestas

☒ Usar cota 3D

☐ Z es un máximo local en la cresta

☐ Fichero de líneas 3D de ruptura

☒ Analizar perfiles típicos: 0°, 45°, 90° y 135°

☒ Analizar perfiles extra: 22.5°, 67.5°, 112.5° y 157.5°

Ráster resultado:

Opciones avanzadas

Curvas singulares:

☐ Ningún tratamiento

☒ Vecindad

☐ Análisis distancias

Buffer exterior:

Ponderación isolíneas:

Límite interpolación lineal:

☒ Ignorar perfiles planos

Severidad:

Criterio en zonas con perfiles sin 2 isolíneas:

☐ Se interpola con todos los perfiles

☒ Solamente se interpolan perfiles con 2 isolíneas

☐ Se marcan con NODATA

Tipo: ☐ integer ☒ real

Si existen múltiples Z, escoger:

☒ más alta (ortofoto) ☐ más baja (hidrografía)

Máscara para la región a interpolar:

Figura 2. Cuadros de diálogo de la configuración de los principales parámetros de control del procedimiento de interpolación y de la elección de las fuentes de información

PROCESO DE INTERPOLACIÓN

El proceso de interpolación no consta de un único algoritmo, sino que consiste en un conjunto de procedimientos y reglas seleccionados heurísticamente de entre varios de los planteados en la bibliografía especializada, *Douglas (1983)*, *Douglas (2000)*, *Douglas (1986)*, *Laurini y Thompson (1992)*, *Maune (2001)*, *Felícísimo (1994)* y *Taud et al. (1994)*. El procedimiento madre es el trazado de perfiles entre las curvas de nivel y considerando además las intersecciones sobre otras entidades 3D, cómo carreteras, crestas y vaguadas. Considerando la especial disposición de los datos en las curvas de nivel, con muchos datos de igual valor muy cercanos pero alineados y grandes zonas sin ningún dato entre ellas, este método suele ser mejor que la aplicación de interpoladores entre puntos.

Sobre cada celda del modelo ráster resultado, se trazan 8 perfiles (cada 22.5°) que exploran toda la información posible a su alrededor de forma similar a como operan otros algoritmos previamente propuestos, esencialmente basados en el de *Douglas (1983)* y *Douglas (2000)* (también se ha desarrollado una versión reducida a 4 perfiles para propósitos más modestos, donde se priorice el tiempo de ejecución). La adquisición de información en este entorno de la celda se realiza de forma puramente vectorial puesto que los métodos que previamente rasterizan acaban realizando los cálculos a partir de posiciones originales desplazadas hacia los centros de celda del ráster que se pretende obtener y, además, generan artefactos al explorar siguiendo el movimiento del alfil que no detecta ciertas intersecciones. Es en el trazado de estos perfiles dónde se usan las condiciones especiales de topología de las curvas de nivel, de la imposición de condiciones de máximo o mínimo de las líneas de cresta o de vaguada y de algunos parámetros adicionales de mayor control (opciones avanzadas).

El trazado de estos perfiles se efectúa utilizando diferentes tipos de funciones (valores constantes, funciones lineales, funciones cúbicas, etc.) según el entorno de cada punto del territorio; de esta manera se evitan los problemas de excesiva simplicidad derivados de la aplicación de solamente funciones lineales (las cumbres y valles quedarían como planos horizontales), pero también se evitan los artefactos y la lentitud de cálculo que pueden aparecer si se aplican funciones cúbicas o *splines* en todo momento.

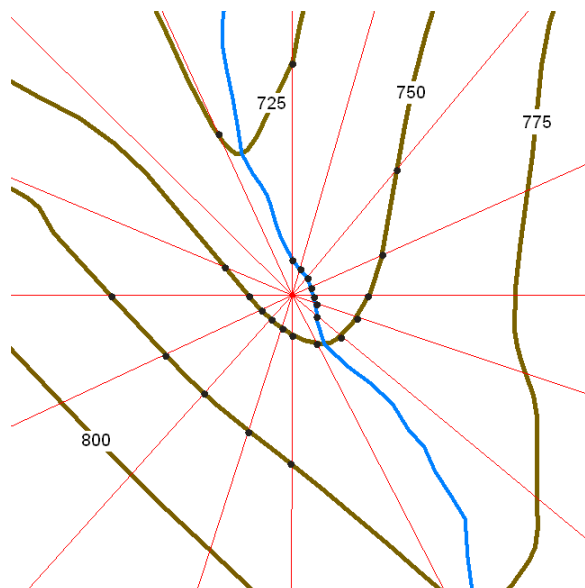


Figura 3. A partir del punto problema correspondiente al centro de celda se trazan los perfiles que cortan con las curvas de nivel y una línea de vaguada.

Usando la información de todos los perfiles se determina el valor final de la celda correspondiente a partir de considerar distintos pesos ponderados por la distancia. Esta ponderación de los distintos perfiles se modula por una función inversa de la distancia con comportamiento controlado mediante el exponente; con ello se consigue que el interpolador sea exacto cuando algún vértice coincide con la localización del centro de la celda. El valor recomendado para el exponente es 1.0, ya que se ha comprobado que genera un MDE y un modelo derivado de pendientes satisfactorio; en cambio, un valor 1.2 da mejores resultados si solamente nos interesan las elevaciones. La implicación de todos los perfiles en el valor de cada celda permite un resultado mucho menos facetado que el obtenido con los métodos de elección simple (perfil de mayor pendiente) y evita tener que suavizar el MDE final mediante la aplicación de filtros de media que acaban empobreciendo la calidad del modelo.

Si la información altimétrica es adecuada, el procedimiento general explicado hasta ahora resuelve de forma satisfactoria la gran mayoría de situaciones y genera un MDE muy válido, mayoritariamente suave, pero que reproduce al mismo tiempo morfologías abruptas. Si en el resultado se observan algunos artefactos, estos pueden minimizarse o incluso llegan a desaparecer, ajustando, de forma adecuada, algunos de los parámetros específicos u *opciones avanzadas* que se detallan a continuación:

- **Tratamiento de curvas singulares:** Para curvas aisladas en medio de una llanura extensa, que pueden llegar a dar formas estrelladas en la interpolación, existen distintos niveles de tratamiento: ningún tratamiento especial, remuestreo en una vecindad próxima, remuestreo adicional previo análisis de distancias a curvas más lejanas.
- **Criterio isolíneas exteriores:** Cuando existan celdas donde determinados perfiles interseccionan con un único perfil (típicamente celdas más allá de la isolínea más exterior), puede elegirse transferir la altitud de este único perfil, ignorar este perfil usando el resto de perfiles o marcar como valor NODATA la celda considerándola no interpolable.
- **Límite de validez para interpolaciones no lineales:** Acotando a una distancia máxima el uso de interpolaciones no lineales se evitan determinados artefactos en zonas llanas y próximas a fondos de valles. Se ha comprobado que este límite suele ser dependiente de la equidistancia entre curvas y por defecto se usa un factor 20.
- **Zona exterior a considerar:** Para que la calidad del modelo en los límites de su ámbito sea comparable al de su interior, es totalmente recomendable que se disponga de información altimétrica en una zona exterior suficientemente amplia. Habitualmente se fusionará información para dar lugar a un ámbito por exceso y se ajustará este parámetro de zona exterior para recortar aquella información que es muy distante y, por lo tanto, poco influyente en la interpolación. y así reducir cálculos innecesarios. Si se reduce excesivamente esta zona exterior, los límites del MDE quedarán mal interpolados.

Una vez realizado el proceso de interpolación se cubrirá el modelo generado por aquellos polígonos que marcan zonas de altitud constante. Se puede optar por transferir a las celdas afectadas un valor preestablecido, heredado del campo correspondiente de la base de datos del polígono, o usar un valor que el propio MDE uniformice a través del perímetro que delimita el polígono.

Como características generales, es importante resaltar que, aunque la precisión de los datos originales puede ser diversa: coordenadas Z habitualmente en formato real de 1 o 2 decimales,

alturas enteras de las curvas de nivel, etc., internamente todos los cálculos se realizan en formato real de doble precisión (15-16 cifras significativas) y se opta por generar los valores finales del MDE en formato entero o formato real de precisión simple (7-8 cifras significativas). También se ha realizado un importante esfuerzo en introducir procedimientos que aceleren los cálculos, valorando a su vez, un razonable uso de los recursos del ordenador.

El formato del MDE generado, es, en la implementación realizada, el IMG de MiraMon. Principalmente consta de dos ficheros, el IMG con los valores interpolados correspondientes a cada centro de celda, y el fichero I.REL con los metadatos esenciales: sistema de referencia, ámbito, número de columnas y filas, etc., así como aquellos metadatos que añadirán documentación de autoría, calidad, parámetros del proceso, etc., siguiendo los estándares ISO19115 e ISO19139, y que dan un valor añadido de rigor y calidad de la información generada.

La experiencia en el cálculo del MDE utilizando esta metodología ha demostrado que la resolución debe de estar entre 1 y 0.5 milímetros a la escala del mapa original (fuente de las curvas de nivel). Por ejemplo, se generará un MDE de 5m, a lo sumo 2.5 m, para curvas procedentes de un topográfico 1:5000 Esta resolución evita, en la mayoría de casos, los artefactos que se producen en las zonas muy llanas y con la falta de información en relación a la equidistancia entre las curvas originales. Si se precisa mayor resolución, es mucho mejor optar por una densificación posterior del MDE obtenido (por ejemplo con el módulo DensRas en el caso de MiraMon)

METODOLOGÍAS COMPLEMENTARIAS

En este apartado se detallan diversos procedimientos que tienen dos finalidades: preparar y verificar las bases cartográficas de las que se alimentará el proceso de interpolación anteriormente descrito y generar un parámetro global y objetivo de calidad del MDE: el *root mean square (RMS)*, a partir de información altimétrica que no haya participado en el proceso de interpolación.

Si se desea generar un MDE de una zona que abarque la extensión de diversas hojas de una serie cartográfica, será necesario crear unas bases previamente fusionadas a la interpolación. Para la interpolación de una determinada hoja se añadirán las capas de las 8 vecinas. En esta fusión se verificará que no existan discontinuidades de una misma curva de nivel entre las diversas hojas. Al mismo tiempo debe verificarse esta condición para las curvas en el interior de cada hoja, caso menos probable, pero existente en todos los ejemplos reales que los autores han analizado. También es necesario comprobar que no hay intersecciones entre distintas curvas de nivel, ya que en este caso el interpolador daría artefactos mucho más visibles que si no se corrigen los anteriores problemas topológicos.

Si se usan las líneas de cresta y vaguadas como aporte adicional de información altimétrica se deberá verificar que las coordenadas Z de los vértices 3D están comprendidas entre las alturas de las curvas de nivel vecinas. En las aplicaciones generadas por los autores (que se detallan en el siguiente apartado) se optó por únicamente usarlas como indicador de máximos y mínimos locales, debido a la excesiva incoherencia hallada entre las coordenadas Z y las curvas de nivel. Esta incoherencia se detectó claramente de forma visual, pero se puede automatizar un primer análisis como transformando los vértices en puntos y usando el procedimiento de verificación de coherencia de cotas que se detallará a continuación.

Para verificar el error global del MDE es necesario usar como puntos de test, las cotas altimétricas u otros objetos puntuales (vértices geodésicos) que no hayan participado en el proceso de interpolación. En primer lugar es necesario descartar aquellas cotas que son incoherentes con las curvas de nivel. Para ello se crean polígonos definidos por curvas de nivel consecutivas y por un marco que rodea el ámbito del MDE. Es necesario que cada polígono herede los atributos de las curvas que lo rodean y ocasionalmente el “no-atributo” del marco. Si mediante el algoritmo

de ‘punto al polígono’ (por ejemplo *Burrough* (1998)) transferimos las alturas de los polígonos al punto podremos deducir qué cotas son erróneas, o como mínimo incoherentes respecto a las curvas (quizá sean las curvas quienes tengan el error). Se clasifican como erróneas aquellas cotas con altitud no comprendida en el intervalo de las dos curvas que la rodean, o si la cota está rodeada de una única curva y el marco y excede de la equidistancia. Por ejemplo, si disponemos de curvas cada 5 m una cota de 247.8 m debe estar entre las curvas 245 y 250 o más allá de una supuesta curva de altura máxima de 380 m no deberíamos encontrar cotas mayores a 385 m. Como se comentaba anteriormente, esta metodología es también válida para detectar vértices erróneos de objetos lineales distintos de las propias curvas.

Una vez se han filtrado las cotas erróneas respecto a las curvas usadas, se realiza una transferencia del valor de altitud del MDE a la cota, en la localización exacta de la cota, para poder comparar (obtener la diferencia) de la altitud real de la cota con la altitud estimada por la interpolación. Para la obtención de la altitud del MDE en las coordenadas exactas de la cota, que presumiblemente no coincidirá con el centro de la celda, es más adecuado realizar una interpolación a 4 vecinos (bilineal) o a 8 vecinos (bicúbica) que una simple consulta por vecino más próximo. A partir de estas altitudes del modelo interpolado podemos obtener el RMS.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (z_{\text{cota}} - z_{\text{MDE}})^2}{n}}$$

MDE DE ANDORRA

Por encargo del *Departament de Medi Ambient* del *M.I. Govern d'Andorra* se generaron dos modelos digitales de elevaciones a 2.5 m y a 5m (por remuestreo del primero) y los correspondientes modelos derivados de pendientes. Andorra ha sido un marco idóneo para poner a prueba la metodología desarrollada por dos motivos: su extremado relieve, un rango altitudinal superior a 2000 metros y pronunciados desniveles en una región de solamente 468 km², y la posibilidad de disponer de toda la información de un mapa topográfico 1:5000 3D. Aunque es recomendable una resolución de 1 milímetro en la escala del mapa, en este caso se optó por una resolución de 2.5 metros, por los motivos ya expuestos de un relieve especialmente abrupto y para una mayor funcionalidad en el uso de ficheros no excesivamente pesados y unos tiempos de cálculo razonables.

La información de base se importó de la cartografía topográfica 1:5000 digital cedida por el *Àrea de Cartografia i Topografia* del *M.I. Govern d'Andorra*. Concretamente se extrajeron todas las curvas de nivel (con una equidistancia de 5m en las curvas secundarias), todas las cotas altimétricas y aquellas bases que indicaban fondos de valle: ríos y torrentes. Durante la generación del MDE se detectaron algunos errores en esta información de base, como por ejemplo curvas de nivel de altitud variable, incoherencias entre algunas cotas y curvas e inconsistencias topológicas entre hojas topográficas, que se solucionaron de forma manual.

El cálculo se realizó para cada una de las 74 hojas de la base cartográfica 1:5000. Tal como se ha expuesto en las **Metodologías complementarias**, en la interpolación de cada hoja, participaron también las bases de las 8 hojas vecinas, de esta manera al fusionar los 74 MDE se pudo obtener un MDE sin discontinuidades.

A partir de más de 22000 cotas independientes del cálculo del modelo, se efectuó un test de calidad que demostró que el 68 % de los puntos tenían un error inferior a 1.3 m en altitud, mientras que el 99 % de los puntos tienen un error inferior a 3.3 m en altitud. Dadas las características topográficas del territorio andorrano se considera que el MDE generado es de una elevada calidad.

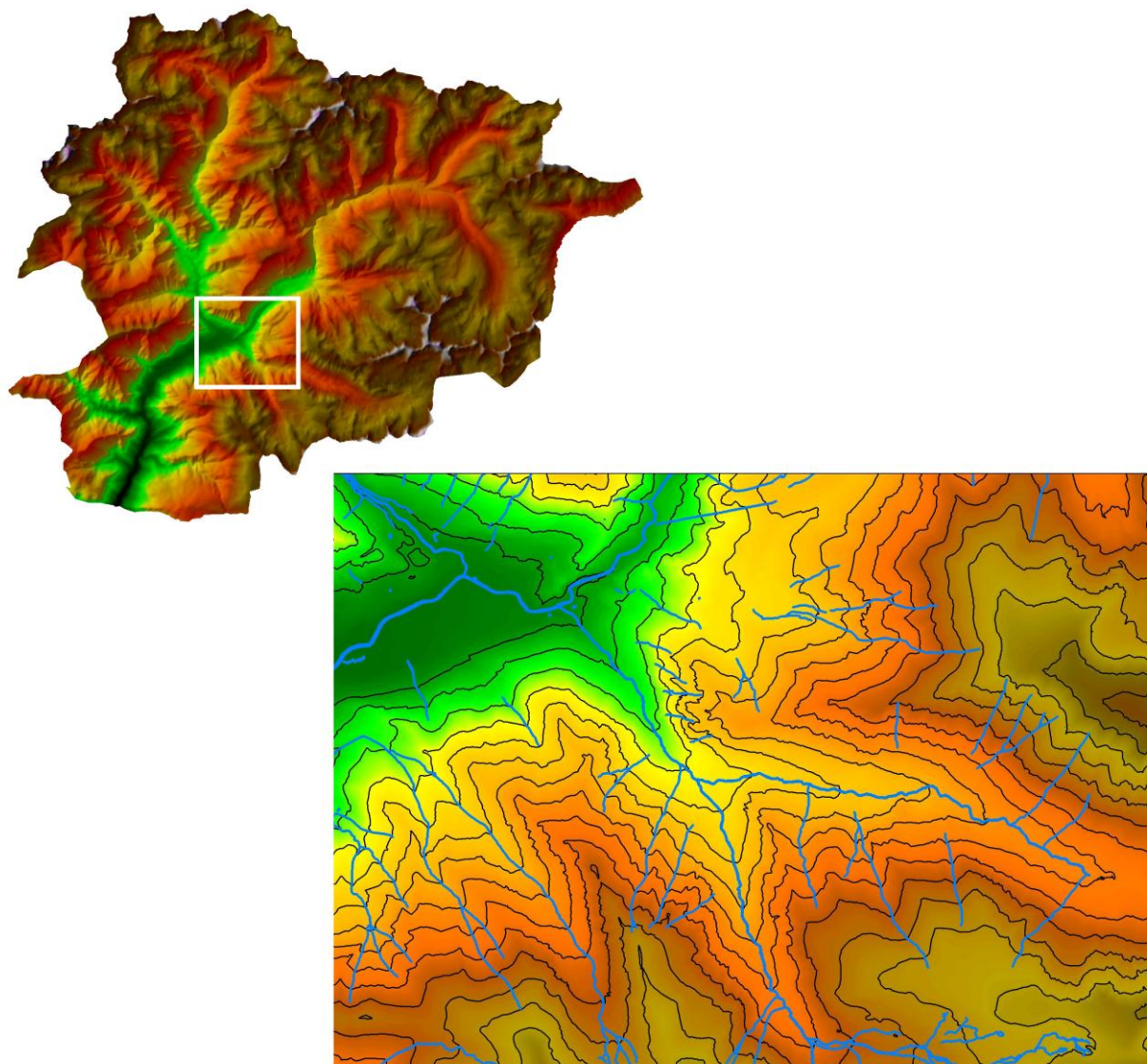


Figura 4. Modelo Digital de Elevaciones de Andorra (sombreado) y detalle de un ámbito central del MDE (sin sombras) con superposición de curvas de nivel e hidrografía

MDE DE LA GARROTXA

La comarca de la Garrotxa, un territorio de media montaña en el interior de la provincia de Girona de unos 735 km² y un rango altitudinal de 1400 m aproximadamente, ha sido el segundo ámbito donde se ha probado a fondo la metodología presentada en este trabajo. Gracias al soporte del *Departament de Medi Ambient i Habitatge* de la *Generalitat de Catalunya* y del *Consell Comarcal de la Garrotxa* y la cartografía elaborada por el *Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)*, los autores ha generado un modelo digital de elevaciones a 2.5 m y el modelo derivado de pendientes a la misma resolución.

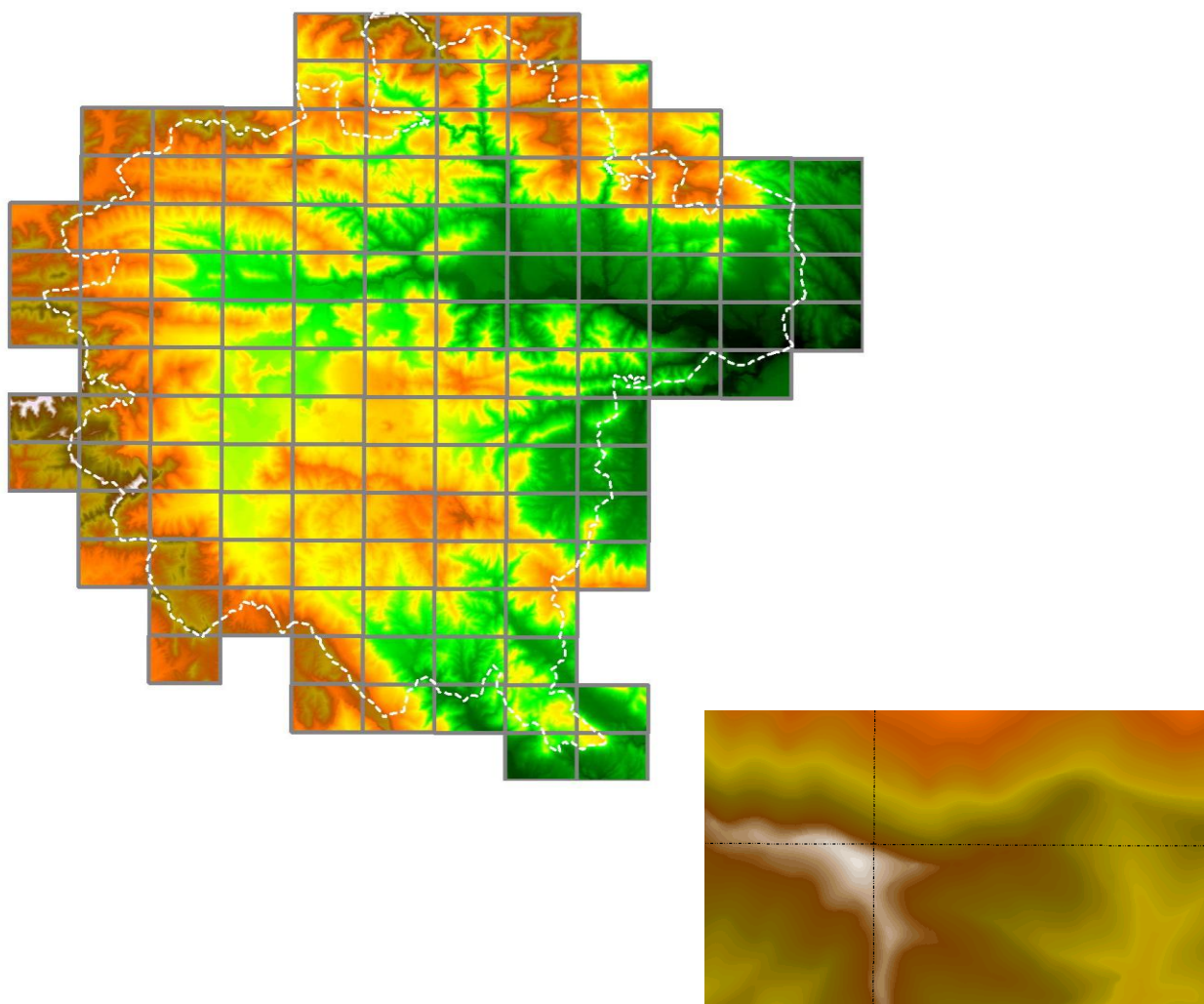


Figura 5. Modelo Digital de Elevaciones de la Garrotxa. Izquierda: se observa la división en hojas de la serie cartográfica 1:5000 y los límites de la comarca. Derecha: detalle donde se comprueba la continuidad entre hojas

Como fuente de información altimétrica se han usado las curvas maestras y secundarias (equidistancia a 5 m) de 127 hojas del topográfico 1:5000 del ICC, versión 2 correspondientes al ámbito de la comarca. Como fuente de información adicional se utilizaron las capas de hidrografía y como test de validación alrededor 72300 cotas de las 72569 existentes en estas 127 hojas. El motivo de descartar unas 250 cotas fue la incoherencia con de las curvas de nivel más próximas. Así mismo, se corrigieron algunos problemas topológicos que afloraron en observar algunos artefactos en el modelo generado y que desaparecieron al corregir sus causas.

Se obtuvieron, por consiguiente, 127 MDE, con unos RMS por hoja que van desde 0.77 m a 1.42 m y con un valor promedio de 1.04 m en su conjunto. El MDE fusionado a partir de las 127 hojas se generó sin discontinuidades en las zonas de solapamiento y, lo que todavía es más indicativo de su calidad, sin evidenciar discontinuidades en el modelo derivado de pendientes.

CONCLUSIONES:

Se ha demostrado con dos aplicaciones (Andorra y La Garrotxa) que los procedimientos de interpolación expuestos en este trabajo son una metodología perfectamente válida y que a partir de las clásicas y todavía muy habituales fuentes de información altimétrica, se puede generar un

producto de una elevada calidad, que a su vez permite aflorar algunos problemas topológicos y errores de coherencia de las fuentes originales, de forma que el método puede ser una herramienta indirecta de validación de las fuentes de cartografía.

Aunque individualmente los métodos de interpolación aquí expuestos corresponden a las herramientas algorítmicas tradicionales, los autores introducen novedades en su combinación, elección de las más apropiadas según las situaciones morfológicas del relieve y un análisis riguroso de la calidad del producto generado.

REFERENCIAS:

- Bonham-Carter, G.F. (1994) *"Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS"* Pergamon.
- Burrough, P.A. i R.A. McDonnell (1998) *"Principles of Geographical Information Systems"* Oxford University Press. Oxford.
- Douglas, D.H. (1983) "The XYNIMAP family of programs for geographic information processing and thematic map production" Wellar, B.S., ed., *Auto-Carto Six, International Symposium on Automated Cartography 6th, Ottawa Canada, Proceedings: v. II, p. 2-14*
- Douglas, D.H. (1986) "Experiments To Locate Ridges And Channels To Create A New Type Of Digital Elevation Model" *Cartographica*, 23(4):29-61.
- Douglas, D.H. (2000) CONSURF "Contour to grid algorithm"
<http://www.hig.se/~dds/research/consurf/consurf1.htm>
- Felícísimo, Á.M. (1994) *"Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales"* Biblioteca de Historia Natural, 3. Pentalfa Ediciones. Oviedo.
- Laurini, R. i Tompson, D. (1992) *"Fundamentals of Spatial Information Systems"* Academic Press. Londres.
- Maune, D.F. (2001) *"Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual"* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda.
- Pons, X. (2000) *MiraMon. Sistema de Información Geográfica y software de Teledetección*, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra. ISBN: 84-931323-4-9 En Internet: <http://www.creaf.uab.es/miramon>
- SRTM (2000): Shuttle Radar Topography Mission. National Aeronautics and Space Administration (NASA) En Internet: <ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>
- Taud, H., Parrot, J.F., Alvarez, R. (1999) "DEM generation by contour line dilation" *Computers and Geosciences* 25(7): 775-783