

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD EN MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES

Bibliografía Comentada



Producto a evaluar (200 × 200 m)

σ
 μ
RMSE
 ΔH



Producto a evaluar (200 × 200 m)



Producto de referencia (10 × 10 m)



Producto de referencia (10 × 10 m)

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD EN MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES

Bibliografía Comentada

José Luis Mesa Mingorance. Profesor Titular del
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría. Universidad de Jaén

Dr. Francisco Javier Ariza López. Catedrático del
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría. Universidad de Jaén

2019

UJa.
Universidad de Jaén



Grupo de Investigación Ingeniería Cartográfica

Este documento es una revisión bibliográfica sobre la Evaluación de la Calidad en Modelos Digitales de Elevaciones, tomando como base una selección de publicaciones científicas relacionadas, desde el año 1990 hasta la actualidad.

Este trabajo se encuadra en el desarrollo de una tesis doctoral dentro del Programa de Doctorado de Tecnologías de la Información y de la Comunicación de la Universidad de Jaén.

El trabajo se ha desarrollado bajo la dirección del Profesor Dr. Francisco Javier Ariza López durante el desarrollo del primer curso del programa de doctorado del Profesor D. José Luis Mesa Mingorance.

Editado por el Grupo de Investigación Ingeniería Cartográfica

Este libro se publica bajo licencia Creative Commons: Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional



Autores: José Luis Mesa-Mingorance

e-mail: jlmesa@ujaen.es Sitio web: <http://orcid.org/0000-0003-1894-2154>

Francisco Javier Ariza-López

e-mail: fjariza@ujaen.es Sitio web: <http://orcid.org/0000-0002-5204-3630>

ISBN: 978-84-09-15226-1

Diseño de portada y contraportada: José Luis Mesa-Mingorance.

Para citar este libro usar lo siguiente:

Mesa-Mingorance, J.L.; Ariza-López, F.J. (2019). Evaluación de la Calidad en Modelos Digitales de Elevaciones. Bibliografía Comentada. Grupo de Investigación Ingeniería Cartográfica, Universidad de Jaén, Jaén, España.

Contenido

Introducción	3
Definición de estadísticos más empleados.	7
Advertencias.....	8
Bibliografía Comentada.....	9
Acrónimos y Abreviaturas	91

Introducción

En la Cartografía analógica se ha expresado la altimetría del terreno de muy diversas formas a lo largo de la Historia, así pues, podemos hablar de perfiles abatidos, sombreados a la acuarela, líneas de máxima pendiente, curvas de configuración horizontal, etc. Pero fue en las curvas de nivel (Sistema de Planos Acotados) dónde se encontró la expresión del relieve más aproximada a la realidad, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo, es decir, desde la expresión de la morfología del terreno a la expresión de valores de pendiente, altitudes, etc. Por similitud con la Cartografía tradicional (en formato papel), en el trabajo cartográfico actual, la altimetría se trabaja con el manejo de los Modelos Digitales de Elevación.

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE), son productos geomáticos manejados por software específicos, que permiten modelar y analizar la superficie topográfica. Generalmente se debe distinguir entre dos términos, que se usan con bastante frecuencia, ambos referidos a productos geomáticos muy similares. Se trata de los propios Modelos Digitales de Elevación (MDE) y los Modelos Digitales de Superficie (MDS). Son productos que están formados por información de la misma naturaleza, con la diferencia de que en el caso de un MDE son altitudes referidas al terreno desnudo, libre de vegetación y edificaciones, mientras que en el MDS los edificios, vegetación, etc., se mantienen, y estando referida la altitud a la superficie topográfica sin la eliminación de estos elementos tanto naturales como antrópicos.

Los MDE son utilizados en infinidad de aplicaciones hoy día, sobre todo en las relacionadas con las Ciencias Medioambientales, Geología, Biología, Hidrología, Ingeniería, Telecomunicaciones, entre otras. En cada una de las aplicaciones los MDE tienen una influencia en el resultado final o en el modelo derivado del análisis realizado. Esta influencia puede ser en algunos casos bastante decisiva en el resultado obtenido. Es por ello, que unos datos deficientes en el MDE pueden derivar modelos erróneos que conduzcan a una toma de decisiones o conclusiones erróneas o poco precisas.

Por todo lo descrito en el párrafo anterior, el estudio de la calidad de los MDE es algo que se ha tenido en cuenta y se ha puesto en valor desde el inicio del uso de estos productos geomáticos. Hablar de calidad de un producto geomático abarca una serie de aspectos que afectan al propio producto. Uno de ellos es la calidad posicional, que en la mayoría de las ocasiones viene dado por un parámetro que expresa la exactitud de las medidas o posiciones obtenidas en el uso del producto geomático. En el caso de los MDE es frecuente hablar de exactitud altimétrica de los datos facilitados por el mismo, como expresión de la calidad, obviando otra serie de parámetros o componentes de la calidad. El dato altimétrico es realmente el único dato que nos facilita un MDE, por lo que hablar de calidad en un MDE es hablar de su exactitud altimétrica (exactitud posicional), ya que el resto de componentes de la calidad parecen no tener mucho impacto en el uso al que se destinan los MDE. Así pues, la exactitud temática, compleción y coherencia lógica carecen de importancia en este caso, si bien la exactitud temporal podría tener cierta importancia dada la evolución permanente de la superficie topográfica en algunas zonas, ya sea por desastres naturales,

intervención del ser humano, etc. También la Genealogía o linaje de los datos podría ser de relevancia en los MDE, ya que nos proporcionan información de la fuente, procesos, procedimientos..., seguidos en la formación del MDE. Por supuesto, los metadatos son una componente de la calidad necesaria y útil en cualquier caso.

Este documento trata de realizar una revisión bibliográfica, en su mayoría artículos de revistas científicas, sobre esta temática concreta: *la evaluación de la calidad de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE)*.

Se han revisado un total de 176 trabajos entre artículos científicos, publicaciones de congresos, normas, informes y tesis doctorales (Tabla 1). La mayoría de los trabajos corresponde a los últimos 28 años, partiendo de 1990 aproximadamente, anteriores a esta fecha se sitúan tres normas, NMAS, EMAS, ASPRS de 1947, 1983 y 1989 respectivamente.

Tabla 1. Tipos y número de documentos revisados

Tipo de Documento	Cantidad
Artículos científicos	138
Conferencias en congresos	27
Informes	2
Normas	8
Tesis doctorales	1

Para la selección de los trabajos revisados se han utilizado varias plataformas on-line. En un primer momento, y más importante dada la cantidad de trabajos recopilados a través de ella, ha sido mediante búsqueda en la base de datos *ScienceDirect*. En segundo lugar, se ha realizado una recopilación mediante *Google Académico*. En ambas búsquedas se han utilizado como palabras clave *DEM*, *Assessment* y *Quality*. Todos los trabajos revisados tienen relación directa con la evaluación de la calidad del MDE mediante algún procedimiento propuesto. En muchos casos no es el objetivo del trabajo, si no que se trata de analizar la influencia de los MDE en modelos derivados, concretamente la calidad o exactitud de esos modelos derivados, en función del MDE empleado, por lo que de una forma indirecta se evalúa también el MDE.

Teniendo en cuenta que un MDE es producto geomático, que posteriormente será utilizado para diferentes fines y propósitos, debe tener un sistema de gestión de la calidad en su proceso productivo para satisfacer las necesidades del usuario. No obstante, debe existir una evaluación al producto final que certifique de algún modo la calidad, exactitud altimétrico/posicional en este caso, del producto que se está usando. Siendo ésta el objetivo estudiado en nuestro trabajo. De todos los trabajos seleccionados, unos tienen como fin la evaluación del MDE, o de algún modelo derivado, otros en cambio tienen otros objetivos prioritarios, pero de alguna forma realizan la evaluación cualitativa o cuantitativa de un MDE, siendo ésta de utilidad para el desarrollo del estudio que se lleva a cabo en el trabajo en cuestión.

Existen algunos estándares, aceptados a nivel internacional, que facilitan directrices de cómo expresar la calidad posicional, es decir, qué estadístico y qué tipo y número de elementos de control emplear (siendo en su mayoría datos puntuales de mayor exactitud

que el producto a evaluar). Ningún estándar detalla el procedimiento que se ha de seguir en esa evaluación (cómo seleccionar los datos de control, qué naturaleza deben tener, medios de captura de la información, etc.). Algunos de esos estándares se han incluido en la revisión bibliográfica (NMAS, EMAS, FGDC, etc.).

Existen infinidad de MDE de diferentes fuentes y organismos que se han tratado a lo largo de todos los trabajos revisados. En los primeros artículos y trabajos se trabaja con MDE obtenidos por Fotogrametría e incluso a partir de curvas de nivel de mapas digitalizados, y en los más recientes se trabaja con MDE cuya principal fuente es el LiDAR. Se advierte también una evolución en el tratamiento de la exactitud posicional desde unos trabajos a otros, dada la naturaleza de los datos de partida para la formación de MDE, por ejemplo, se tiene en cuenta la cubierta del terreno a la hora de evaluar la calidad, no se consideran las discrepancias en altitud como una variable de comportamiento Normal en su distribución, se empieza a poner el énfasis en la Estadística Robusta, entre lo más destacado.

En la mayoría de los trabajos lo que se analiza es la diferencia de altitud entre el MDE a evaluar y una fuente de mayor exactitud, en la mayoría de las ocasiones mediante el uso de datos puntuales. Para ello se realiza una selección de una serie de puntos de mayor exactitud que cubran la extensión de todo el MDE, repartidos de forma aleatoria, estratificados por tipos de cubierta del suelo, por zonas de pendiente, etc. Los estadísticos más empleados son μ , σ y RMSE. Debemos aclarar que en la revisión de cada trabajo se ha intentado seguir la notación o designación que cada autor ha reflejado en su trabajo para estas discrepancias, por lo que puede existir una falta de homogeneidad a la hora de hacer referencia a ellas, aunque hemos procurado que sea lo suficientemente claro y no haya lugar a ambigüedades en el tratamiento de los estadísticos, independientemente de la notación seguida por cada autor.

La evaluación de la calidad de un MDE puede ser realizada desde un punto de vista funcional, es decir, se evalúa la calidad del MDE en función del resultado del procedimiento en el que participe el MDE, como por ejemplo la obtención de cuencas de drenaje, redes de drenaje, cuencas visuales, etc. Esta calidad funcional puede ser de utilidad para aquellos profesionales de otras áreas del conocimiento que pueden decidir qué MDE utilizar en función del uso al que lo vayan a destinar. A lo largo de nuestra revisión bibliográfica hemos encontrado trabajos que de forma indirecta tratan esta evaluación de la calidad, siempre de forma parcial en alguna aplicación o modelo derivado muy concreto. La situación ideal sería aquella que en los metadatos del MDE se acompañara de una información que nos indique cuál es la mejor utilidad del MDE, y qué grado de exactitud tiene para un amplio abanico de usos.

Como ya hemos mencionado, en la mayoría de los trabajos analizados se ha intentado respetar el uso de términos que emplean los autores, tales como: *exactitud*, *precisión*, *calidad*, etc., cuando hacen referencia a la exactitud posicional (altitud) en un MDE. Es por ello que consideramos importante aclarar los términos *precisión*, *incertidumbre*, *exactitud* y *calidad*. La *precisión* se define como el grado de coincidencia existente entre los resultados independientes de una medición, obtenidos en condiciones estipuladas, ya sea de repetitividad, de reproducibilidad o intermedias, generalmente es expresada en términos numéricos cuando se trata de medidas de dispersión, por ejemplo, por medio de la

desviación típica (σ) o de la varianza. La *incertidumbre* se define como el grado de coincidencia entre el valor medio obtenido de un gran serie de resultados y un valor aceptado como referencia. La *exactitud* se define grado de acuerdo entre el resultado de un prueba y el valor de referencia aceptado (ISO 3534-1). A lo largo del desarrollo del documento se ha utilizado el término *incertidumbre* para describir las diferencias entre la altitud del MDE evaluado y la altitud del dato de referencia, ya que se trata de un valor aceptado como de mayor exactitud, en pocas ocasiones se ha empleado el término *error*, salvo cuando hacemos referencia a la clasificación de los diferentes tipos de error que intervienen en un MDE, pero siempre de forma genérica. Finalmente, la *calidad* se define como “propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor” (RAE). En Cartografía se producen un conjunto de transformaciones desde la realidad hasta llegar a obtener el producto cartográfico, generalmente éste será la base de un estudio, proyecto o ejecución, por lo que la calidad del mismo influirá en la calidad de la toma de decisiones posterior que se realice. La calidad de cualquier producto cartográfico vendrá definida por su capacidad para satisfacer las necesidades de la persona que lo utiliza (usuario) para un fin determinado, así pues, fundamentalmente se trata de que el producto ofrezca una utilidad adecuada para toma de decisiones en las que intervendrá. Desde una perspectiva cartográfica, esto significa que representa la realidad con la mayor fidelidad posible, tanto en el ámbito de la posición, de la geometría, de la semántica de lo que se representa, como de los procesos que ocurren sobre el terreno.

La calidad de los MDE se puede evaluar desde un punto de vista cualitativo, esto es algo poco frecuente, ya que puede llegar a ser muy subjetivo, pero que en algunos estudios de los presentados se realiza, en la mayoría de las ocasiones se trata de una evaluación visual para la búsqueda de atípicos que desvirtúen la superficie topográfica.

Finalmente, en casi todos los trabajos revisados se supone que la exactitud de las coordenadas X e Y de cualquier localización es muy elevada, o no se considera relevante, algo que no siempre es así, y un error en las coordenadas X e Y nos conduce a un valor de Z desvirtuado.

Una vez introducidos algunas ideas del trabajo, así como alguna aclaración necesaria para una lectura adecuada del documento, en el siguiente apartado aparecen los resúmenes de cada uno de los trabajos revisados, previamente se incluyen un breve recordatorio de los estadísticos más frecuentemente empleados y una relación de abreviaturas que se manejan a lo largo del documento.

Definición de estadísticos más empleados.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - Y_i) - \mu]^2}{n - 1}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

donde, X_i es el valor medido de la altitud en el MDE evaluado, Y_i es el valor de la altitud en la misma localización, pero proveniente de una fuente de mayor exactitud, y n el número total de localizaciones puntuales consideradas.

Advertencias

En algunos trabajos hacemos referencia a DH, como las diferencias en altura entre las altitudes de los puntos, altitudes del MDE evaluado y la de las fuentes de mayor exactitud.

En otros trabajos se utiliza una notación muy útil cuando se hace referencia a los MDE ($MDE_{\text{referencia}}$, $MDE_{\text{perturbado}}$, $MDE_{\text{analizado}}$, etc.), esta notación se ha utilizado en aquellos artículos que el autor los utiliza y se ha seguido la notación del propio autor del trabajo. Se ha intentado seguir las notaciones que cada autor ha seguido en su trabajo, siempre que sea claro el mensaje que se transmite en el resumen de los mismos.

Bibliografía Comentada

1. USBB (1947). *United States National Map Accuracy Standards*. U.S. Bureau of the Budget. Washington. // Conocido por el acrónimo NMAS, se trata de un estándar de apenas una hoja de extensión en el que se establece el método de evaluación y reporte de la exactitud posicional en los productos cartográficos en EEUU desde 1947. Se trata de una norma muy sencilla, tanto en su concepción como en su aplicación, que ha tenido una gran repercusión a nivel internacional. En este método la comparación se realiza con datos de mayor exactitud. Se analiza tanto la componente horizontal (X e Y, de forma conjunta) como la componente vertical (Z), de forma independiente. El elemento utilizado para la determinación de la exactitud del producto es el dato puntual. Éste estándar estima si la cartografía analizada se encuentra dentro de ciertos límites de error preestablecidos tanto para la componente horizontal (X e Y) como para la vertical (Z). Los errores vienen dados por la diferencia de posición entre los puntos situados en la cartografía a analizar y los puntos homólogos en una fuente de mayor exactitud. Se utilizan puntos bien definidos y fácilmente identificables (intersección de carreteras, esquinas de edificios, etc.). El estándar indica que para cartografía mayor de E20k el 10% de los puntos de la muestra puede tener un error horizontal mayor de 1/30 de pulgada (0.846 mm); para cartografía menor de E20k¹ el 10% de los puntos de la muestra puede tener un error horizontal mayor de 1/50 de pulgada (0.508 mm); en el caso de la componente vertical el estándar indica, que como máximo, el 10% de los puntos de la muestra pueden tener un error vertical mayor de la mitad del intervalo de las curvas de nivel, éste error vertical permite corregirlo modificando la posición horizontal de los puntos en igual cuantía que el error horizontal aceptable.
2. ASCE (1983). *Map Uses, scales and accuracies for engineering and associated purposes*. American Society of Civil Engineers, Committee on Cartographic Surveying, Surveying and Mapping Division, New York. // Es conocido como estándar EMAS y se propone como alternativa al NMAS para cartografía a gran escala. Al igual que la mayoría de los estándares, emplea datos de mayor exactitud como referencia. Analiza la componente horizontal y vertical, en este caso la componente X e Y por separado. Los datos de control utilizados son puntos. Se obtienen estadísticos para analizar si existen desplazamiento sistemático (errores sistemáticos) y si la variabilidad está acotada (errores aleatorios). Está basado en hipótesis sobre los límites aceptables para los errores aleatorios (se emplea el estadístico χ^2 , *Chi-cuadrado*) y sistemáticos (para esto se emplea el estadístico t_x , *t de Student*). El estándar permite definir los umbrales aceptables de error sistemático y el nivel de confianza. Se controlan de forma independiente las componentes X, Y y Z de la muestra de, al menos, 20 puntos bien definidos y fácilmente identificables.
3. ASPRS (1989). *Accuracy Standards for Large Scale Maps*. En PE&RS, vol. 56, nº 7, 1068-1070. // Es un estándar diseñado para mapas topográficos a gran escala. Establece unos datos de control provenientes de fuentes de mayor exactitud. Se analiza la componente horizontal (X e Y separadamente) y vertical por separado. Los datos utilizados para el control de calidad son datos puntuales. Establece tres categorías de

¹ La notación que se utilizará de ahora en adelante para referirnos a la escala de una cartografía, de forma que por ejemplo E24k sería Escala 1/24.000 (simbolizando la “k” los miles del denominador de la escala).

calidad (Clases I, II y III) según los resultados de la evaluación. En el caso de mapas de la mejor calidad (Clase I), se establecen límites al RMSE para las componentes X e Y según la escala del mapa. En altimetría se considera que el RMSE es de 1/3 del intervalo entre curvas de nivel, salvo en el caso de disponer de puntos acotados que será de un 1/6 del intervalo. Los límites para los mapas de Clase II y III se obtienen multiplicando por 2 y por 3 los límites del Clase I, respectivamente. Se utiliza una muestra de puntos de control de, al menos, 20 puntos.

4. DoD (1990). *MIL-STD 600001: Mapping, Charting and Geodesy Accuracy*. U.S. Department of Defense. Washington. // Más que un estándar es un compendio de parámetros y procedimientos estadísticos que se pueden emplear en el cálculo y determinación de la exactitud de un producto cartográfico. Establece la premisa de que el uso al que va destinado el producto cartográfico establece los requerimientos mínimos de exactitud. Diferencia los conceptos de exactitud absoluta y relativa tanto horizontal como vertical. La exactitud absoluta está referida al datum, al que se referencia el producto cartográfico, mientras que la relativa es la referida a la posición entre datos dentro del propio producto cartográfico. Ambos valores de exactitud se expresan en unidades terreno y son calculados de acuerdo a una distribución de probabilidad específica e informados a un nivel de confianza específico (generalmente al 90%).
5. ISAACSON, D.L.; RIPPLE, W.J. (1990). *Comparison of 7.5-Minute and 1-Degree Digital Elevation Models*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 56, nº 11, pp. 1523-1527 // Se comparan dos MDE del USGS, uno de ellos obtenido a partir de cartografía topográfica E24k y con un espaciado de malla de 30×30 m, y el otro obtenido de la misma forma, pero a partir de cartografía topográfica E250k y con un espaciado de malla de unos 90×90 m. La finalidad del trabajo es comparar la incertidumbre que presentan algunos parámetros derivados de los MDE, tales como gradiente de la pendiente y orientación de la pendiente del terreno. El trabajo se realiza en una zona montañosa en Oregon (USA). Se obtienen 80 observaciones en un modelo, y otras 80 observaciones en el otro modelo en las mismas posiciones, realizando una comparación de la altitud, gradiente y orientación de la pendiente. Para esta comparación se realiza previamente un remuestreo del modelo de 90×90 m para dejarlo en un espaciado de 30×30 m. La diferencia media en altura (ΔH) tiene una $\mu=31$ m, y la desviación estándar $\sigma=6,99$ m. Como conclusión, los autores indican que las zonas más llanas son las que muestran mayores diferencias para los parámetros estudiados. Finalmente se indica en qué estudios y análisis pueden ser idóneos el empleo de cada uno de esos MDE.
6. ZHILIN, LI. (1991). *Effects of Check Points on the Reliability of DTM Accuracy Estimates Obtained from Experimental Tests*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 57, nº 10, pp. 1333-1370 // Aborda las características que debe tener un conjunto de puntos de control (en adelante *pd*c), obtenidos por métodos topográficos para su uso en la evaluación de la calidad de un MDE. En primer lugar, se debe obtener, en el MDE, la altitud de los puntos homólogos a los *pd*c. La diferencia en altitud (ΔH) es considerada una variable aleatoria para su tratamiento estadístico. Se utilizan cerca de 1800 *pd*c que proceden de la nube de puntos original de la que se deriva el MDE, pero éstos *pd*c no intervinieron en el proceso de elaboración del MDE a controlar. Se considera que son tres parámetros los que pueden afectar en la estimación de la calidad del MDE: el tamaño de la muestra de *pd*c, la exactitud de la

muestra (incertidumbres estándar en la posición de los puntos muestreados), y su distribución espacial sobre el área de estudio. Los resultados en dos zonas, de diferente morfología topográfica, de Suecia y Alemania (Uppland y Sohnstetten, respectivamente) muestran que en Uppland, con 578 pdc, se obtienen unos valores para ΔH de $\mu=0,05$ m y $\sigma=0,59$ m y que, conforme disminuye el tamaño de muestra, los valores estimados para μ y σ son algo mayores. Sin embargo, con un tamaño de muestra mayor no mejoran excesivamente esos valores de μ y σ . En otras zonas, el número de pdc puede variar en función de sus características, en una zona más montañosa (Sohnstetten) obtiene el límite en 379 pdc. También se analiza la distribución de pdc en ambas áreas, en este caso se emplean solo 500 pdc y se cambia la configuración de su distribución utilizando 15 iteraciones. Para este caso, el comportamiento de μ y σ ha sido muy similar, tal que sus valores no varían apenas en las 15 iteraciones. Así, los valores obtenidos son $\mu=0,22$ m y $\mu=0,15$ m; $\sigma=0,56$ m y $\sigma=0,38$ m, en Uppland y Sohnstetten, respectivamente. Según el autor, este hecho también es debido a la aleatoriedad de la selección de los 500 puntos en cada una de las 15 iteraciones, ya que su forma de distribución en la zona de estudio ha sido muy similar.

7. ZHILIN, LI (1992). *Variation of the Accuracy of Digital Terrain Models with Sampling Interval*. Photogrammetric Record. 14(79), pp. 113-128 // Se analiza la exactitud de varios MDE, utilizando para ello datos fotogramétricos de mayor exactitud que los empleados para la obtención del MDE. Se utilizan tres zonas de estudio, una de Suecia (Uppland) y dos de Alemania (Sohnstetten y Spitze), y para cada una se emplean 1700 pdc. Cada área posee características diferentes en cuanto a su morfología. En este estudio se analiza la correlación entre la exactitud del MDE y su tamaño de malla. Se emplean diferentes tamaños de malla, desde 28×28 m a 80×80 m para Uppland, 20×20 m a 56×56 m para Sohnstetten y 10×10 a 20×20 m para Spitze. Los resultados para ΔH reflejan un aumento de μ y σ al aumentar el espaciado de la malla en las tres zonas. Así, para Uppland los valores medios son $\mu=0,26$ m y $\mu=0,41$ m para las mallas de 28×28 y 80×80 m, respectivamente, y la $\sigma=0,63$ m y $\sigma=1,14$ m para las mismas mallas. En el caso de Sohnstetten $\mu= -0,11$ m y $\mu=0,59$ m para las mallas de 20×20 y 56×56 m, respectivamente, y $\sigma=0,56$ m y $\sigma=2,47$ m. En la zona de Spitze $\mu=0,07$ m y $\mu=0,07$ m para las mallas de 10×10 y 20×20 m, respectivamente, y sus valores de desviación son $\sigma=0,21$ m y $\sigma=0,36$ m. Al incluir en el MDE líneas de ruptura, que añade información relevante, se consigue mejorar la exactitud ligeramente en algunos casos, al repetir el estudio variando el tamaño de la malla, los resultados de μ y σ vuelven a aumentar conforme se incrementa el tamaño de la malla, en este caso los valores obtenidos para cada una de las zonas son los siguientes parejas de valores para las mallas anteriormente indicadas: en Uppland $\mu=(0,24; 0,32)$ m y $\sigma=(0,59; 0,77)$ m; en Sohnstetten $\mu=(-0,15; -0,10)$ m, y $\sigma=(0,40; 1,12)$ m; y en Spitze $\mu=(0,07; 0,06)$ m, y $\sigma=(0,14; 0,16)$ m. Es interesante indicar que los valores de μ y σ se reducen drásticamente en los MDE de tamaño de malla más pequeño.
8. LEE, J.; SNYDER, P.K.; FISHER, P.F. (1992). *Modeling the Effect of Data Errors on Feature Extraction from Digital Elevation Models*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 58, Nº 10, pp. 1461-1467. // Se analiza la influencia del error de un MDE en la exactitud de posibles modelos derivados de éste, en este caso para la obtención de cuencas de drenaje. Se parte de un MDE procedente del USGS y con

tamaño de malla de 30×30 m, considerado exento de errores. Este MDE se perturba introduciéndole errores en altimetría, las simulaciones se realizan estableciendo los errores con una distribución normal de $\mu=0$ y $\sigma=7$ m, variando la autocorrelación de distribución de los errores de 0,5 a 0,6. Posteriormente, se varían la magnitud de error tomando $\sigma \in [1, 7]$ pero ya no se contempla autocorrelación. A partir de los MDE perturbados, se obtienen las redes de drenaje (el software empleado es IDRISI), y se comparan con la red obtenida del MDE sin perturbar. Las diferencias se analizan por medio de omisiones y comisiones de celdas en las redes de drenaje procedentes de cada MDE perturbado. Al aplicar la autocorrelación en la distribución del error el valor medio de celdas clasificadas como pertenecientes a la red de drenaje aumenta en un 50%, desde una autocorrelación de 0,9 a una de 0,0. Cuando disminuye la magnitud del error, el número de celdas clasificadas aumenta desde 580 para $\sigma=7$ m, a 1122 celdas para $\sigma=1$ m, y la omisión de celdas se rebaja de 741 a 81 celdas, para los mismos valores de σ .

9. CONNORS SASOWSKY, K.; PETERSEN, G.W.; EVANS, B.M. (1992). *Accuracy of SPOT Digital Elevation Model and Derivatives: Utility for Alaska's North Slope*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 58, nº 6, pp. 815-824 // Se propugna el uso de imágenes SPOT como alternativa a la Fotogrametría aérea para la obtención de MDE en zonas donde no existe una cobertura cartográfica detallada, y donde es importante el desarrollo de estudios medioambientales. Se evalúa la exactitud de un MDE derivado de SPOT y de pendientes, y orientaciones extraídas de él. La zona de estudio se sitúa en el Norte de Alaska, con una extensión de 25 km² y un desnivel máximo de 250 m. Los dos conjuntos de datos de referencia para la evaluación son: 1) cartografía E63,36k del USGS (intervalo de curvas de nivel de 15,24 m); 2) cartografía E6k, con un intervalo de curvas de nivel de 5 m. A partir de ellas se obtuvieron dos MDE con malla de 10×10 m, al igual que el tamaño de malla del MDE a analizar y obtenido a partir de imágenes SPOT. En total se obtuvieron 211.128 puntos en cada modelo, que se contrastaron entre sí para estimar la exactitud del MDE de SPOT. Para ΔH se obtiene: $\mu=13,7$ m y $\sigma=13,5$ m frente a la cartografía de referencia con 15,24 m de equidistancia y $\mu=-19,3$ m y $\sigma=18,5$ m, frente a la cartografía de referencia con 5 m de equidistancia. También se comparan los gradientes de pendiente y orientación, para ésta última se comparan los valores de orientación celda a celda. En el caso de la pendiente (expresada en tanto por ciento %) las diferencias medias y desviaciones son (en %) $\mu=-1,6$ % y $\mu=-0,9$ y $\sigma=9,7$ y $\sigma=9,9$ % respecto a los MDE de 5 y 15 m de equidistancia, respectivamente. También se realiza esta comparación variando el tamaño de malla del modelo entre valores de 10 m, 20 m y 70 m. Finalmente se determina que la distribución de las diferencias de altitud sigue una distribución Normal, aunque con un sesgo entre 12 m y 18 m, lo cual indica la presencia de un sistematismo del que no aclara cuál puede ser su origen.
10. GEORGE E. KARRAS; PETSAS, ELLI (1993). *DEM Matching and Detection of Deformation in Close-Range Photogrammetry without Control*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 59, nº 59, pp. 1419-1424 // Se aplica Fotogrametría de objeto cercano a la orientación absoluta de pares estereoscópicos, sin puntos de apoyo. Se propone detectar zonas de curvatura similar entre dos MDE para conseguir un emparejamiento (*matching*) tridimensional; en otros casos se utiliza la orientación de las pendientes del terreno como elemento para el emparejamiento. Se

utiliza la técnica “*data-snooping*”², que permite la detección de errores groseros, y la orientación basada en regiones similares de los MDE y en la localización de deformaciones. En este contexto la “orientación” significa tanto el emparejamiento de superficies como la detección de deformaciones. El trabajo concluye indicando que los errores cometidos en el emparejamiento están muy próximos a los errores cometidos en la digitalización e interpolación. El método discutido se presta a la introducción de técnicas que permitan la localización de deformaciones.

11. ZHILIN, LI (1993). *Mathematical Models of the Accuracy of Digital Terrain Model Surfaces Linearly Constructed from Square Gridded Data*. Photogrammetric Record. Vol. 14(82), pp. 661-674 // Se desarrollan modelos matemáticos para la predicción de la exactitud de MDE, tomando en consideración determinados factores (pendiente, densidad y distribución de puntos en la construcción del MDE, etc.). Se estudia la propagación de los errores, considerando los errores propios de los nodos de la malla, más los errores propios de la interpolación lineal o bilineal entre nodos, para determinar la altitud de cualquier punto que no pertenezca a la malla. Las ecuaciones del modelo matemático conseguidas representan analogía a la fórmula de Koppe³. Con el modelo matemático se probaron datos de tres zonas (baja, media y alta pendiente y rugosidad del terreno: Uppland en Suecia, y Sohnstetten y Spitze en Alemania). Se contrastaron los resultados con pruebas experimentales utilizando datos medidos con mayor exactitud. La diferencia media entre las pruebas experimentales y el modelo predictivo propuesto son: $\mu = -0,13$ m, $\mu = 0,11$ m y $\mu = -0,03$ m en cada una de las zonas, Uppland, Sohnstetten y Spitze respectivamente. Los resultados no arrojan unas diferencias claras entre el modelo matemático y el método de evaluación que compara con datos puntuales de mayor exactitud. Se concluye que los modelos matemáticos dan predicciones razonablemente buenas.
12. ZHILIN, LI. (1993). *Theoretical models of the accuracy of Digital Terrain Models: An evaluation and some observations*. Photogrammetric Record, vol. 14(82), pp. 651-660 // Se evalúan modelos teóricos para cuantificar la exactitud de MDE a través de un análisis teórico y pruebas experimentales. Las zonas de trabajo son Uppland (Suecia), Sohnstetten (Alemania) y Spitze (Alemania). Se pretende disponer de un modelo matemático que cuantifique la exactitud de un MDE con un tamaño de malla dado. Se referencian algunos modelos teóricos previos (p.ej. modelos basados en el Análisis de Fourier, modelos basados en el análisis de autocovarianza y variogramas, modelo basado en el análisis espectral de alta frecuencia). Se realiza un experimento aplicando el análisis del variograma y el análisis espectral de alta frecuencia. Los resultados de los modelos se comparan con estimaciones obtenidas de forma experimental. Los dos modelos analizados se comportan de forma muy diferente. En el caso del modelo basado en el variograma, las diferencias respecto a los resultados experimentales para las medias son $\mu = (0,28; 0,18; 0,08)$ m para Uppland, Sohnstetten, y Spitze, respectivamente. Si se considera un MDE combinación de datos malla, líneas

² Esta técnica tiene una finalidad bioestereométrica en aplicaciones al cuerpo humano, ya que la fijación de puntos de apoyo sobre el cuerpo humano puede ser una tarea difícil.

³ Conocido como Test de la Fórmula de Koppe, se emplea como alternativa al test NMAS, un método que emplea fuentes de mayor exactitud. En este caso se emplean coeficientes derivados empíricamente para estudiar efectos de las pendientes del terreno sobre el error medio en la componente vertical (mediante análisis de regresión entre la tangente de la pendiente, como variable independiente, y el error vertical, como variable dependiente)

fundamentales y puntos singulares del terreno, las diferencias obtenidas son $\mu=(0,38; 0,31; 0,13)$ m, respectivamente. Como se observa los valores aumentan al considerar datos combinados. En el caso de análisis espectral de alta frecuencia ocurre lo contrario, las diferencias con respecto al MDE base son $\mu=(-0,20, -0,21; -0,32)$ m para Sohnstetten, Spitze y Uppland respectivamente, y considerando el MDE con datos combinados los resultados obtenidos son $\mu=(-0,09; -0,10; -0,22)$ m. El autor no determina la causa de tal comportamiento con certeza, indica que es probable que el comportamiento diferente sea debido a la manera de cálculo y obtención de los modelos matemáticos.

13. BOLSTAD, P.V.; STOWE, T. (1994). *An Evaluation of DEM Accuracy: Elevation, Slope, and Aspect*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 60, n° 11, pp. 1327-1332 // Se parte de dos MDE de una zona de Virginia (USA), facilitados por el USGS, con una resolución de 30×30 m, el primero obtenido por Fotogrametría (Gestalt Photomapper) y el segundo a partir de imágenes pancromáticas SPOT. Se usó una técnica de estereocorrelación desarrollada por STX Corporation. Se utilizan cinco métodos para caracterizar la exactitud de los MDE: a) evaluación visual de los MDE, b) comparación de los MDE utilizando las altitudes de los vértices geodésicos de diferentes órdenes, c) diferencias de altitud entre ambos MDE, d) diferencias entre las pendientes y orientaciones de ambos MDE y e) diferencias entre altitud media, pendiente y orientación de una muestra aplicando el contraste test de la t-Student para valores medios (H_0 : no hay diferencia entre las medias para el MDE procedente de SPOT y el MDE procedente del USGS). Finalmente se establecen coeficientes de correlación entre los valores de las altitudes, con respecto a las diferencias en altitud de cada MDE (diferencias calculadas a partir de una muestra de puntos medidos en campo con técnicas GPS); entre pendientes observadas en campo y pendientes derivadas de ambos MDE; y finalmente, entre orientaciones observadas en campo y orientaciones derivadas de ambos MDE. Se observó correlación positiva en el primer y en el segundo caso, no existiendo correlación en el caso de las orientaciones.
14. NEILL, L.E. (1994). *The Accuracy of heighting from aerial photography*. Photogrammetric Record, 14(84), pp. 917-942 // Se proponen comparaciones entre las altitudes de MDE obtenidos por Fotogrametría y nubes de puntos obtenidas por técnicas topográficas, para establecer la exactitud del MDE en función de la escala de los fotogramas empleados en la restitución analítica. Se realizan pruebas experimentales independientes sobre conjuntos de datos procedentes de las escalas de vuelo más empleadas (E2k, E2.5k y E3k) en la zona de Knustford (Reino Unido). Se eligieron 61 pdc, obteniendo las diferencias de altitud para cada conjunto de datos. Como resultado se proponen las exactitudes mínimas recomendadas para cada escala: a) para E3k un RMSE=35 mm, b) para E2,5k un RMSE=30 mm y c) para E2k un RMSE=25 mm.
15. ADKINS, KIRK F.; MERRY, CAROLYN J. (1994). *Accuracy Assessment of Elevation Data Sets Using the Global Positioning System*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 60, N° 2, pp. 195-202 // Se evalúa el producto TTD (U.S. Army Topographic Engineering Center) creado a partir de datos de digitalización de mapas topográficos E24k del USGS, de datos E50k del DMA y de la base de datos de DTED. Se seleccionaron 19 puntos bien definidos en altura y posición (intersecciones de carreteras, etc.) en la zona de Fort Hood (Texas, USA), y se observaron con GPS y nivelación ortométrica para dotarlos de coordenadas, estas

coordenadas fueron comparadas con las coordenadas de la base de datos TTD para obtener las diferencias. Las diferencias encontradas fueron: a) para el caso de TTD $\mu=25,9$ m y $\sigma=18,9$ m, b) en el caso de DTED $\mu=1,5$ m y $\sigma=1,2$ m.

16. ROBINSON, G.J. (1994). *The Accuracy of Digital Elevation Models derived from Digitised Contour Data*. Photogrammetric Record. Vol. 14 (83) pp. 805-814 // Análisis descriptivo sobre los errores que afectan a la obtención de un MDE creado a partir de curvas de nivel digitalizadas. El trabajo se focaliza en tres aspectos: el tipo de terreno, la forma de obtener la muestra de puntos para elaborar el MDE (hace uso de la idea de *variables regionalizadas (kriging)*), y el método de interpolación empleado. Destaca el empleo de modelos TIN, como más adecuados para elaborar el MDE a partir de la nube de puntos obtenidos de las curvas digitalizadas, y se indica que las líneas de cambio de pendiente o de ruptura del terreno (líneas fundamentales) ayudarían a una buena definición de este MDE, y que podrían ser obtenidas de forma automatizada.
17. CANTERS, F. (1994). *Simulating error in Triangulated Irregular Network Models*. Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on Geographical Information Systems. París, Francia, pp. 169-178 // Evalúa la exactitud de valores derivados de un MDE (pendiente u orientación), aunque, a diferencia de otros trabajos, el análisis se realiza sobre modelos TIN y no modelos malla. La obtención de MDE se realiza a partir de imágenes SPOT y se evalúa su calidad con pdc medidos sobre el terreno con técnicas de mayor exactitud. La zona de trabajo se sitúa en la región montañosa de Calvi en Córcega (Francia). Se aplica simulación de Monte Carlo introduciendo ruido en el MDE original, y obteniendo una serie de MDE perturbados sobre los que se realiza el análisis. Los errores introducidos se distribuyen normalmente ($\mu= -10,73$ m; $\sigma= 16,50$ m), aplicando diferentes niveles de autocorrelación en cada caso. Puntualiza la necesidad de tener en cuenta el método de cálculo de la pendiente empleado sobre el modelo TIN, ya que esto puede dar mayor o menor exactitud en su determinación. Los resultados demuestran que la exactitud en los parámetros derivados de un TIN es extremadamente sensible y dependiente de la distribución de errores en altitudes.
18. KRAUS, K. (1994). *Visualization of the Quality of Surfaces and their derivatives*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 60, nº 4, pp. 457-462 // Se considera la altitud del terreno como una función continua de las coordenadas planimétricas ($Z= f(X, Y)$). La hipótesis de partida es que todo MDE está afectado por errores aleatorios que se comportan según una distribución normal. Realiza un análisis de los errores en los valores derivados de pendiente obtenidos del MDE. Las exactitudes de las isolíneas derivadas de esas funciones continuas vienen dadas por una expresión que relaciona el propio error de la componente Z, con el valor de la pendiente en ese punto. El interés del artículo está más en la exactitud planimétrica de las curvas de nivel que la exactitud altimétrica. Muestra gráficamente la exactitud planimétrica de la curvas de nivel elaborando mapas de isocorpletas que muestran el valor de la desviación estándar planimétrica de las curvas. Para pendientes del 100% el valor de $\sigma= 3.4$ m, para el 20% el valor es $\sigma= 5.0$ m. Además, realiza un estudio similar sobre la pendiente derivada, utilizando para ello una representación mediante isolíneas.. Finalmente subraya la importancia de que los usuarios de los SIG estén informados de los errores de estos datos para su posterior uso.

19. ZHILIN, L. (1994). *A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 49, n°1, pp. 2-11 // Se analiza la exactitud de MDE obtenidos a partir de dos fuentes distintas: a) curvas de nivel procedentes de restitución fotogramétrica; y b) malla regular, obtenida a partir de métodos fotogramétricos. Además, se considera la posibilidad de añadir o no información estructurante del terreno (p.ej. picos, divisorias, vaguadas, etc.). El objetivo del trabajo es evaluar la exactitud de MDE obtenidos por curvas de nivel, con y sin datos estructurantes, y la exactitud de MDE de tipo malla, con y sin datos estructurantes, y finalmente, la comparación entre ambos modelos de datos. Para evaluar la exactitud se realiza una comparación con una nube de puntos de mayor exactitud, obtenida por métodos fotogramétricos (unos 2000 pdc aproximadamente). Los resultados son los siguientes, en el caso del MDE obtenido a partir de las curvas de nivel el valor de σ mejora con la introducción de puntos singulares entre un 40% y un 80%, y la μ un 50%. En el caso del MDE de malla, obtenido por métodos fotogramétricos, el valor de σ mejora también con la introducción de datos estructurantes entre un 50 y un 60%, estando la mejora de la media entorno al 50%. En este estudio también realiza una serie de cambios de tamaño de malla del MDE en las tres zonas de estudio (Uppland utiliza 28×28, 40×40, 56×56 y 80×80 m; en Sohnstetten 20×20, 28×28, 40×40, 56×56 m; y en Spitze 10×10, 14×14, 20×20 m) y repite el proceso de cálculo de la exactitud con y sin datos estructurantes en cada tamaño de malla, observando cómo las diferencias entre σ se vuelven mayores conforme aumenta el tamaño de malla. Una de las observaciones más importantes de éste trabajo es que los MDE basados en curvas de nivel pueden considerarse una estrategia de muestreo mejor que la malla regular en áreas con pendientes relativamente fuertes y terrenos muy llanos.
20. ACKERMANN, F. (1994). *Digital Elevation Models – techniques and application, quality standards, development*. IAPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, part IV, pp. 421-432 // Establece los criterios que deben influir directamente en la exactitud de un MDE para unas circunstancias determinadas (tipo de terreno, método de captura de los datos de observación, etc.). Aconseja el uso de modelos malla por su comodidad, facilidad de manipulación, almacenaje, etc. La fidelidad de la superficie interpolada con respecto a la superficie real del terreno es lo que determina la exactitud de un MDE. Matemáticamente esta fidelidad puede ser expresada mediante funciones de transferencia. El problema científico que se plantea es que, dado un nivel de exactitud prefijado para el MDE, y en función del tipo de terreno a representar, se desea determinar la densidad de puntos (paso de malla a establecer). Para ello hay soluciones teóricas si las características del terreno se describen matemáticamente, por ejemplo, por funciones de covarianza, procesos estocásticos o análisis espectral (Fourier). Las respectivas funciones de transferencia para la interpolación como función de la densidad de puntos se pueden derivar posteriormente. Finalmente establece una relación empírica: la exactitud del MDE es linealmente dependiente de la densidad de puntos, según la clase o tipo de terreno. Finaliza el trabajo analizando la calidad de los MDE obtenidos de forma automática mediante la Fotogrametría Digital. Ésta posibilita la captura de mayor número de puntos de observación, lo que aumenta la exactitud global del MDE, aunque no aumente la exactitud de la medida altimétrica de cualquier punto. Se indica que los MDE producidos automáticamente por casado o *matching* de imágenes tienen mejor

exactitud que el modo convencional estereoscópico por dos razones: primero, el *matching* de imágenes puede ser más preciso que la medida estereoscópica; segundo, por la sobreabundancia de datos obtenidos con mayor exactitud, de esta forma la obtención de un MDE de mayor calidad es más directa. Cabe advertir, que se trata de un trabajo que establece y analiza las bases teóricas en relación con la metodología de obtención de MDE a partir de métodos fotogramétricos, en ningún momento realiza test o prueba alguna.

21. FELICISIMO, A.M. (1994). *Parametric statistical method for error detection in digital elevation models*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 49, n°4, pp. 29-33 // Se propone un método automático para la detección y corrección de valores atípicos en un MDE de tipo malla. Este método utiliza criterios estadísticos derivados del propio modelo, para ello se basa en la evaluación de probabilidades de transición, es decir, en las diferencias de morfología entre lugares vecinos. En cada punto se calcula la diferencia de dos valores de altitud para ese punto, el primer valor es el registrado en el propio MDE y el segundo un valor interpolado a partir de puntos vecinos. Usando el método de interpolación bilineal, los cuatro vecinos más próximos pueden ser suficientes. Es un proceso que se aplica a la totalidad del MDE, obteniendo finalmente el valor medio y desviación típica de las diferencias, siendo valores de la población y no de una muestra, ya que se aplica a todos los puntos del MDE. El conocer los parámetros que definen esta distribución permite realizar un test de significación para valores individuales de diferencias, con lo cual se puede validar o rechazar la hipótesis que el valor de desviación individual observado pertenezca o no a la población de desviaciones. Esto se implementa con la t de Student. La corrección de valores de atípicos se puede hacer eliminando el punto (caso vectorial) o aplicando un método de interpolación para colocar un nuevo valor de altitud (caso de MDE en estructura de malla).
22. TANKAGI, M. (1996). *A study of DEM accuracy according to spatial resolution*. Proceedings of the 17th Asian Conference on Remote Sensing. // Se realiza un experimento para observar el comportamiento de la exactitud de un MDE cuando es remuestreado a diferentes tamaños de malla y por varios métodos de remuestreo. Se parte del MDE obtenido por interpolación a partir de un mapa topográfico E25k de una zona montañosa. El MDE posee un tamaño de malla de 50×50 m. El objetivo de uso del MDE es el análisis de la estabilidad de laderas, por lo que, los valores de pendiente, orientación e inclinación son importantes. El MDE original se remuestrea a tamaños de 100×100 m, 150×150 m, 200×200 m y 250×250 m. Se concluye que cuanto menor es el tamaño de la malla, menor es la diferencia entre el MDE remuestreado y el original, para ello utiliza histogramas de frecuencias. También se concluye que el mejor método de remuestreo es el del vecino más cercano o al menos el que mejores resultados tiene en este estudio.
23. VEREGIN, H. (1997). *The Effects of Vertical Error in Digital Elevation Models on the Determination of Flow-path Direction*. Cartography and Geographic Information Systems. Vol. 24, n° 2, pp. 67-79 // Se centra en la propagación de los errores de un MDE a partir del cual se derivan otros productos (p.ej. modelado hidrológico, red de drenaje, cuenca hidrográfica y direcciones de drenaje). Se examina el comportamiento del algoritmo D-8 para la determinación de las direcciones de drenaje sobre un MDE del USGS con malla de 30×30 m. Para evaluar el comportamiento de los modelos

derivados se perturba al MDE original ($MDE_{original}$) con errores en la altitud ($MDE_{perturbado}$), cuyo valor máximo de error es el que establece el USGS para este tipo de MDE. El resultado son diferencias apreciables entre los modelos hidrológicos derivados del $MDE_{original}$ y los $MDE_{perturbado}$, para ello calcula, celda a celda, la dirección del flujo en cada MDE. Las discrepancias aumentan con el incremento del error y con la pendiente del terreno. Es significativo que en terrenos llanos las discrepancias son también mayores, ello es debido a la fuerte sensibilidad de estas zonas a los errores verticales cuando se determinan los flujos de drenaje.

24. GESCH, D.B., LARSON, K.S. (1997). *Techniques for development of Global 1-Kilometer Digital Elevation Models*. Proceedings Pecora Thirteen: Human Interactions with the Environment: Perspectives from Space. // Se propone un método para la elaboración de MDE a escala global, con una malla de $30 \times 30''$ de arco (aprox. 1×1 Km). Se trabaja sobre África, y se parte de dos fuentes de datos: 1) *Digital Chart of the World* (DCW), que proporciona curvas de nivel, redes de drenaje, etc., que posteriormente se convierten en datos malla y 2) datos del DTED, de malla $3 \times 3''$ (90×90 m). El método es el siguiente: a) los datos DTED han de someterse a un proceso de generalización a una malla de $30 \times 30''$, b) conversión de la DCW en un MDE en formato malla, y c) unión de ambos MDE. Según los autores, con ambas fuentes se obtiene el MDE con una exactitud vertical algo mejor de $RMSE=100$ m.
25. CARRARA, A.; BITELLI, G.; CARLÁ, R. (1997). *Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines*. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 11 n° 5 pp. 451-473. // Se evalúa la calidad de MDE obtenidos de curvas de nivel de mapas topográficos a E25k. Se emplean cuatro métodos de interpolación, dos basados en mallas de puntos regularmente espaciados (10×10 m) (uno implementado en GRASS v.4.1 y desarrollado por el U.S. Army; y otro desarrollado por los autores denominado MDIP); y dos métodos basados en TIN (uno implementado en ARC/INFO v.7.0 y desarrollado por ESRI; y otro implementado en MGE v.5 y desarrollado por Intergraph). Se establecen cinco criterios de calidad para los MDE obtenidos: 1) en los puntos cercanos a una curva de nivel, cuya distancia sea inferior al espaciado de la malla, su altitud debe ser igual o casi igual a la de la curva, tal que debería diferir menos del 5%; 2) en el área delimitada por un par de curvas de nivel consecutivas todos los puntos que se sitúen dentro deben tener altitudes acorde al intervalo de altitudes entre ellas; 3) dentro de esas áreas las altitudes deben variar casi linealmente entre las curvas de nivel, 4) en zonas llanas las altitudes del MDE deben reflejar un patrón razonable con una morfología realista; 5) la proporción de altitudes de un MDE que no definen de forma real la morfología del terreno (valores atípicos) deben estar entorno al 0,1% ó 0,2% del total de puntos del conjunto. Se trabaja con los MDE de tres zonas de diferentes características, en el norte y sur de Italia. Se establecen unos intervalos de altitud y se determina el área que ocupa cada intervalo y la diferencia de áreas entre el mapa original digitalizado y la curva obtenida por algún método de interpolación, empleando los cuatro métodos indicados. Se analizan las ventajas y desventajas de cada método a la luz de los cinco criterios de calidad establecidos. Según los resultados de este trabajo el mejor interpolador de tipo malla es el MDIP, y el mejor interpolador de tipo TIN es el que aplica el software de *Intergraph*, MGE.
26. HUSS, R.E.; PUMAR, M.A. (1997). *Effect of Database Errors on Intervisibility Estimation*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 63, n° 4, pp. 415-

424 // Se describe un método para determinar la intervisibilidad suponiendo un valor de error en los datos obtenidos de un MDE. El método consiste en analizar la probabilidad de intervisibilidad en diferentes direcciones (equiespaciadas en azimut) desde un punto de observación hasta un radio determinado de distancia (25 Km). La base de datos utilizada cubre una región de 120×120 Km de California y se trabaja con un MDE malla de 300×300 m de espaciado. También se utiliza un MDE de 100×100 m y mayor exactitud. Se establecen dos puntos de observación para el estudio, uno en una zona llana y otro en una zona montañosa, ambos puntos se consideraron elevados 3 m sobre el nivel de suelo para el estudio de visibilidad y 60 m el punto visado. Se demuestra una fuerte sensibilidad de la varianza del resultado de la intervisibilidad al error del MDE, la rugosidad y lo accidentado del terreno representado por el MDE.

27. CARSON, W.W.; REUTEBUCH, S.E. (1997). *A rigorous test of the accuracy of USGS Digital Elevation Models in forested areas of Oregon and Washington*. ACSM/ASPRS Annual convention and exposition technical paper; Seattle. Vol. 1 Surveying and Cartography, pp. 133-143 // Se utilizan 23 MDE de una zona de bosques de Oregon y Washington (EE.UU.). Los MDE proceden de la cartografía E24k del USGS. De ellos 10 fueron producidos por digitalización a partir de las curvas de nivel del mapa topográfico, y los 13 restantes a partir de métodos fotogramétricos. Se hicieron comparaciones de MDE con ambos procesos de producción, y también comparación de MDE clasificándolos en función de la morfología del terreno (montañoso, ondulado, llano), con el fin de analizar la influencia de estos factores en la exactitud del MDE. Para la evaluación de la exactitud se emplearon 4.355 pdc repartidos en los 23 MDE, y obtenidos a partir de cartografía de mayor detalle, y por métodos de medida fotogramétrica. Los resultados indican: 1) que el RMSE < 7 m para todos los MDE, 2) que el RMSE < 5 m para los MDE obtenidos a partir de las curvas de nivel, 3) que el RMSE < 3 m para los MDE obtenidos por métodos fotogramétricos. Se destaca que el RMSE facilitado por el USGS se aproxima bastante al valor obtenido en este estudio en aquellos MDE obtenidos por digitalización, y se considera que esto podría deberse a la similitud del método de producción de los MDE.
28. LÓPEZ, C. (1997). *Locating some types of random errors in Digital Terrain Models*. International Journal Geographical Information Science. Vol. 11, nº7, pp. 677-696 // Algoritmo para localizar errores atípicos y errores aleatorios. El método puede ser aplicado por productores y usuarios. Se empleó un MDE de 50×50 m para una zona de 7,5×5 Km próxima a Estocolmo. Se hace uso del ACP (Análisis de Componentes Principales) para la determinación del comportamiento de los errores. El método consiste en analizar por filas, y por columnas, la malla del MDE. Se analizan perfiles y en ellos se localizan los errores por medio del ACP. Al hacerlo en modo fila y columna permite cruzar finalmente los resultados para obtener las zonas de mayor probabilidad de existencia del tipo de error buscado. Es un método iterativo, tras una primera iteración se obtienen tasas cercanas al 5% de errores aislados detectados, al aumentar las iteraciones la convergencia va siendo mayor, en la quinta iteración se alcanza el 100%.
29. DEAN B. GESCH (1998). *The effects of Digital Elevation Model Generalization Methods on derived Hydrologic Features*. 3^{er} International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Quebec, Canada // Método de generalización basado en la morfología del terreno llamado

“Énfasis de las líneas de rotura”, cuyo principal objetivo es mantener las líneas estructurantes del relieve en el modelo generalizado. El método consta de dos pasos: 1) obtener del modelo a generalizar las líneas estructurantes (cordilleras, barrancos, etc.); 2) selección de valores en las celdas generalizadas en función de la presencia de líneas estructurantes en las celdas originales, o de la ausencia de éstas características. Se observa una mejor descripción de las líneas estructurantes del terreno en los MDE generalizados por éste método que en los MDE generalizados por otros métodos (p.ej. remuestreo, estadísticos, etc.).

30. GAO, J. (1998). *Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid DEMs at a micro-scale*. International Journal Geographical Information Science, Vol. 12, nº 8, pp. 875-890 // Se evalúa la influencia del tamaño de la malla del MDE sobre parámetros derivados (gradiente de la pendiente, la orientación de la pendiente y morfología del terreno, determinada ésta última a partir de consideraciones simultáneas de orientación y cambio en el gradiente). Además del espaciado de la malla, se tiene en cuenta las características del terreno probando en varios tipos de terreno (llano, montañoso y ondulado). Se aplica el test χ^2 de Pearson para analizar el intervalo a partir del cual son significativas las diferencias entre el MDE de referencia (10×10 m) y los demás MDE (20×20 m, 30×30 m, 40×40 m, 50×50 m y 60×60 m). Los MDE que se analizan fueron obtenidos tras una digitalización de las curvas de nivel de mapas topográficos y posterior interpolación por Krigeage. Se consideran varias fuentes de incertidumbre: la del mapa topográfico base; la interpolación realizada para la obtención de la malla; y la que produce la malla en las propiedades del terreno. Finalmente se analiza la influencia del paso de malla sobre el gradiente de la pendiente, la orientación y forma de la pendiente. El lugar de realización del análisis se sitúa en Horseshoe Mountain, Virginia (EE.UU.). El porcentaje de variación en las variables topográficas explicadas por inexactitud del MDE son: en orientación (87,9; 92,4; 87,5) %, en llano, montañoso y ondulado, respectivamente; en gradiente (7,5; 87,5; 98,9) % en llano, montañoso y ondulado, respectivamente; en morfología (50,3; 95,8; 27,3) % en llano, montañoso y ondulado, respectivamente.
31. HUISING, E.J.; GOMES PEREIRA, J.M. (1998). *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 53, pp. 245-261 // Se analizan los factores de error que pueden intervenir en la captura de datos topográficos mediante el láser escáner: errores motivados por sistema láser, errores introducidos por el GPS y el sistema inercial y, sobre todo, los errores motivados por el filtrado de los datos (depuración de los datos para la eliminación de los edificios, vegetación, etc.). Las estimaciones de los errores de los MDE se obtienen a partir de la media y la desviación estándar de las diferencias de altitud. Estos valores se calculan después de validar los MDE con datos de fuentes más exactas, como Fotogrametría o Topografía clásica. Una de las conclusiones es que la técnica necesita mejorar ya que algunos de esos errores no se explican satisfactoriamente, y los valores de error deberían ser fácilmente detectados y eliminados, o reducidos. Finalmente deja propuesto el chequeo empírico del sistema.
32. FLORINSKY, I.V. (1998). *Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models*. International Journal Geographical Information Science, Vol. 12, nº 1, pp. 47-61 // Las variables topográficas se pueden derivar a partir de una

función de la altitud $Z=f(x,y)$ en una vecindad al punto considerado, donde se pueden obtener: G (gradiente de la pendiente), A (orientación de la pendiente), k_h y k_v (curvatura de la superficie tanto horizontal y vertical). La exactitud de estos valores se ha determinado habitualmente por la comparación de valores de referencia obtenidos por métodos más exactos; aquí se pone en duda este método, ya que los valores medidos de referencia no son del todo exactos, si bien es el método aplicado para la evaluación de la exactitud. Los resultados son representaciones cartográficas de la distribución del RMSE obtenido de las diferencias de valores de las variables topográficas locales del MDE y la referencia. De los resultados destaca la correlación negativa detectada entre el RMSE del parámetro G . Los valores más altos de RMSE del parámetro A se observan en zonas llanas con poca pendiente, al igual que para los valores de curvatura horizontal y vertical. Según los autores el algoritmo de cálculo de parámetros locales que da mejor resultado de exactitud es el método Evans.

33. SINGH, K.; LIM, O.K.; KWOH, L.K.; LIM, H. (1998). *An Accuracy Evaluation of DEM Generated Using Radarsat Stereo Images*. Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, IGARSS'98. IEEE. International, Vol. 2. // Con el objetivo de analizar la exactitud planimétrica de datos generados de estéreo pares de imágenes Radarsat, se trabaja en una zona próxima a Hong Kong donde la morfología del terreno es bastante quebrada. Se utilizan puntos de control (no se especifica cuántos) cuyas coordenadas se obtienen por: análisis radargramétrico y a partir de cartografía existente a E20k (fuente de referencia). Los resultados son: RMSE = (25; 36,5; 15,8) m para las coordenadas X, Y y Z, respectivamente.
34. BUTLER, J.B.; LANE, S.N. (1998). *Assessment of DEM quality for Characterizing Surface roughness using Close Range Digital Photogrammetry*. Photogrammetric Record, vol. 16 (92), pp. 271-291 // Se presenta un procedimiento para evaluar la calidad de MDE, que ha sido aplicado a los modelos producidos por un algoritmo de estereomatching basado en una correlación cruzada normalizada. Se usó la Fotogrametría Digital para obtener MDE de forma automatizada, con el fin de la caracterización de las propiedades de superficies rugosas (lechos de río de grava natural, de suma importancia para las predicciones en el cálculo de dinámica de fluidos que se acopla a estos MDE). El procedimiento de evaluación de la calidad de MDE implica varias etapas: 1) examen visual de las ortoimágenes, que proporciona un control cualitativo en el rendimiento del estereomatching; 2) estadísticas del MDE que cuantifican el porcentaje de píxeles correctamente emparejados; 3) diferencias de altitud entre pdc, medidos usando medidas de campo independientes, y los correspondientes puntos medidos en el MDE. La evaluación es llevada a cabo en dos estereopares adyacentes con similares características (Río Affric, Escocia), considerando los efectos tanto de los parámetros de elaboración del MDE como los diferentes modelos de lentes empleados. Analiza la calidad a partir de tres conceptos: la precisión, la fiabilidad y la exactitud. Se relacionan estos conceptos con las etapas propuestas en la evaluación de la calidad. La precisión está relacionada con los errores aleatorios de la fuente de medida, ya sea Topografía clásica (para los pdc) o Fotogrametría Digital. La fiabilidad la relaciona con los errores atípicos en las medidas (correcciones incorrectas durante el estereomatching, debido a la pobreza de las imágenes, pobreza de contraste, medidas incorrectas de puntos de apoyo, etc.). Finalmente, la exactitud la relaciona con los errores sistemáticos, en el caso de la

Fotogrametría Digital por ejemplo ignorar los efectos de la distorsión de las lentes, etc. El resultado para la etapa de cálculo de diferencias de altitud entre pdc es de un RMSE de 10 mm.

35. FGDC (1
36. 998). *FGDC-STD-007: Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3. National Standard for Spatial Data Accuracy*. Federal Geographic Data Committee, Reston. // Es el documento que fundamenta el estándar conocido como NSSDA, una norma aplicada obligatoriamente por todas las agencias productoras de cartografía en EEUU. Para el control de calidad emplea fuentes de mayor exactitud. Analiza tanto la componente horizontal (X e Y de forma conjunta) como la componente vertical (Z). Los elementos de control utilizados son puntos . Se basa en el uso del RMSE, y es la agencia que solicita la cartografía o el propio usuario el que decide los umbrales de aceptación, no obstante, el estándar presenta unas tablas en las que se muestran unos valores de RMSE recomendados. Este estándar vino a sustituir al NMAS y al ASPRS. Se selecciona una muestra de al menos 20 pdc, bien definidos sobre la cartografía. A partir del RMSE para X e Y, y otro para la Z, se deriva un valor expresado al 95% de nivel de confianza. El índice de calidad mostrado se expresa en unidades reales sobre el terreno.
37. GOOCH, M.J.; CHANDLER, J.H. (1999). *Accuracy assessment of digital elevation models generated using the Erdas Imagine Orthomax Digital Photogrammetric System*. Photogrammetric Record, Vol. 16(93), pp. 519-531. // Describe los parámetros más importantes utilizados en el sistema de Fotogrametría Digital Erdas Imagine OrthoMax para la obtención de un MDE. Compara unas posiciones del MDE con esas mismas posiciones en una referencia topográfica a E2k. El área se divide en subáreas (campo abierto, campo abierto con bosque, urbano, etc.). Se emplearon entre 5 y 22 pdc en cada subárea. Los pdc son, en su mayoría, intersecciones de carreteras. Posteriormente se cambiaban los parámetros de obtención del MDE (14 parámetros en Erdas) y se observaba la influencia del cambio de cada parámetro. Al final se obtienen unos parámetros optimizados para cada área de estudio. Así, por ejemplo, para áreas urbanas los parámetros por defecto del software dan unas diferencias de altitudes entre MDE y referencia con $\mu = 0,227$ m y $\sigma = 0,456$ m, mientras que los optimizados son $\mu = 0,117$ m y $\sigma = 0,324$ m.
38. ACHARYA, B.; FAGERMAN, J. (2000). *Accuracy assessment of DTM data: A cost effective approach for a large scale digital mapping Project*. Congreso de ISPRS, Amsterdam. Vol. XXXIII, part B2, pp. 105-111 // Se parte del procedimiento fotogramétrico digital de creación de ortofotos y MDE donde es necesario el establecimiento de una serie de puntos de apoyo sobre el terreno: puntos de paso y enlace entre modelos. El cálculo de estos puntos se puede realizar mediante la aerotriangulación. Se propone aumentar el número de puntos, 21 más por modelo, tal que estos puntos van a ser considerados como pdc para el chequeo de la exactitud del MDE obtenido e incluso para el control de la exactitud de la ortofoto. En la parte experimental se seleccionaron puntos bien definidos, como intersecciones de carretera, base de postes eléctricos, etc. En total se utilizaron tres estereomodelos de la zona de Atlanta, EE.UU. Finalmente en este estudio se hace una comparativa de las diferencias de altitud obtenidas en los 63 pdc de los tres MDE obtenidos por Fotogrametría Digital, frente a las diferencias de altitud obtenidas en estudios anteriores de los mismos autores utilizando técnicas de Fotogrametría Analítica. Los resultados para el caso de

la Fotogrametría Digital son $\mu = 0,140$ m y $\sigma = 0,215$ m, y para la Fotogrametría Analítica $\mu = 0,268$ m y $\sigma = 0,293$ m.

39. KOCH, A; LOHMANN, P. (2000). *Quality assessment and validation of Digital Surface Models derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. IAPRS, Vol XXXIII. Amsterdam. // Realiza una descripción introductoria a la Interferometría Radar y expone sus ventajas y características. Posteriormente agrupa y analiza las fuentes de incertidumbre involucradas (parámetros durante la adquisición: longitud base-línea, orientación, etc.; etapas de procesamiento e influencia de las diferentes coberturas del suelo). Se propone un método para la evaluación de la calidad del MDS obtenido, contrastando con un MDE más exacto del LGN (*Landdesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen*), y con vértices geodésicos. Se aplica un proceso de transformación espacial del modelo y un posterior cálculo de covarianza a nivel de punto y desviación estándar relativa.
40. GERSTNER, T.; HANNAPPEL, M. (2000). *Error Measurement in Multiresolution Digital Elevation Models*. Proceeding de 4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Amsterdam, Delft University. // Utiliza el método de la Bisección Recursiva de Triángulos⁴ para construir un MDE multiresolución. Define los indicadores de error que marcan lo adecuado o no de la bisección usada para densificar la malla. En este estudio todos los MDE empleados son de malla y se asume que los datos de entrada para la formación de los MDE están libres de error. El cálculo de los indicadores de error se aborda utilizando Wavelet en el interior de los triángulos, y se basa en el cálculo de la diferencia de altitud entre el modelo aproximado y el original en algunos puntos del modelo. También tiene en cuenta la transformación topográfica sufrida por el MDE al introducir nuevos puntos en la malla, lo cual puede producir un cambio, a veces sustancial, en los modelos que se puedan derivar como determinación de cuencas, etc.
41. LÓPEZ, C. (2000). *Improving the Elevation Accuracy of Digital Elevation Models: A Comparison of Some Error Detection Procedures*. Transactions in GIS, Vol. 4, N° 1, pp. 43-64 // Se describe el método de Felicísimo (ver referencia 21) y se compara con el método desarrollado por el propio autor (ver referencia 28). En el trabajo también se analiza una modificación del propio método diseñada para el manejo de errores fuertemente correlados y que se asemeja al método *multigrad* usado en software científico para la resolución de ecuaciones diferenciales, ya que se indica que los métodos anteriores pierden efectividad al aumentar la autocorrelación de los errores. En la prueba se utilizaron dos MDE, de malla 30×30 m, de origen fotogramétrico de una zona con un tamaño de 12,42×6,9 Km, en una región del sur de Francia. Se determinó la exactitud de ambos MDE mediante comparación de puntos con altitud medida por métodos más exactos. El resultado de valores medios de las diferencias de altitudes es de $\mu = -0,026$ y $\mu = 0,93$ m, respectivamente, y RMSE = 12,70 m en ambos MDE. Se compara la evolución del RMSE aplicando uno u otro método de eliminación de atípicos. Se detecta que el método de Felicísimo encuentra un alto porcentaje de atípicos cerca de las líneas de cambio de pendiente o ruptura del terreno. El método de Felicísimo es más adecuado para zonas de pendiente suave. En zonas de fuerte autocorrelación es mejor el método del autor modificado, a pesar de que la hipótesis

⁴ Consiste en dividir un triángulo original en dos, trazando la bisectriz por uno de los vértices, el vértice opuesto al lado más largo, con ello se consigue densificar la malla original.

inicial es la no correlación de este tipo de errores. Los tres métodos se aplicaron de forma iterativa, eliminando los errores atípicos y volviendo a aplicarlos, hasta que no aparecieran candidatos a valores atípicos.

42. TANG GUO-AN, JOSEF STROBL, GONG JIAN-YA, ZHAO MU-DAN, CHEN ZHEN-JIANG (2001). *Evaluation on the accuracy of digital elevation models*. Journal of Geographical Sciences. Vol. 11, Nº 2, pp- 209-216. // Realiza una clasificación de los errores de un MDE considerando dos componentes: 1) el error de los datos de partida; 2) el error respecto a una fuente de mayor exactitud. Los autores consideran que ésta depende exclusivamente de la resolución del MDE y la rugosidad del terreno. La parte experimental se ejecuta sobre seis tipos de terreno (llano, alta montaña, etc.), en zonas con extensión de 10×10 Km ubicadas en diferentes áreas de China. Se concluye que a mayor tamaño de la malla, le corresponde mayor error. También detectan una correlación positiva entre los errores y la rugosidad o complejidad de la superficie del terreno.
43. LÓPEZ, C. (2002). *An experiment on the elevation accuracy improvement of photogrammetrically derived DEM*. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 16, Nº4, pp. 361-375 // Se reflexiona sobre la necesidad de modelizar los errores que intervienen en la formación de MDE. Se establecen varios niveles de tratamiento del error. Este artículo se enmarca en un nivel inicial. Se emplearon datos exentos de errores sistemáticos de seis áreas distribuidas entre Alemania, Suecia y Noruega y desarrollados en 1983 por Grupo III de Trabajo de ISPRS. Para la detección de valores atípicos se emplearon los métodos de Felicísimo (ver referencia 21) y de López (ver referencia 41). Para la comprobación de los métodos se compara el MDE resultante de eliminación de atípicos y una fuente de mayor exactitud. Para el método de Felicísimo el RMSE se comporta peor en zona montañosa que para el caso del método de López, p.ej. en Uppland (Suecia) el RMSE= 4,11 m frente a un valor de RMSE= 2,878 m. Sin embargo, para las zonas más suaves el comportamiento del método de Felicísimo es mejor, p.ej. en la zona de Spitze (Alemania) RMSE= 1,23 m frente a un valor de RMSE=8,64 m del método de López.
44. WENG, Q. (2002). *Quantifying Uncertainty of Digital Elevation Models from Topographic Maps*. ISPRS Commission IV, Symposium 2002 Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa, Canada. Vol. XXXIV, Part 4 // Los objetivos de este artículo son describir los factores, fuentes y razones que intervienen en los errores de un MDE producido a partir de digitalización de curvas de nivel; y el desarrollo de métodos para cuantificar la exactitud de MDE usando medidas distribucionales (índices de autocorrelación espacial, variogramas, etc.). El índice para expresar la exactitud más empleado es el RMSE, que es un índice sencillo y da un valor global de las desviaciones, pero no tiene en cuenta la variación espacial de los errores. La exactitud del MDE varía con el algoritmo de interpolación empleado, cinco algoritmos se han examinado y comparado en el estudio (Cuadrado de inversa a la distancia, curvatura mínima, método de Shepard modificado, función de base radial y triangulación con interpolación lineal). A partir de estos algoritmos se obtienen MDE malla con una resolución espacial de 50×50 m para una zona localizada en Stone Mountain de Georgia (USA). El algoritmo de función de base radial genera el RMSE más bajo (RMSE= 6,66 m), mientras el algoritmo de triangulación con interpolación lineal el más alto (RMSE= 9,54 m). Según el autor, la mejor forma de establecer un patrón espacial de exactitud es tener una representación gráfica, y la representación

conjunta de la exactitud junto con curvas de nivel puede ser muy indicativa de la relación. Una herramienta empleada son los variogramas. Finalmente, establece que la exactitud de un MDE depende de: 1) el error en la medida de la altitud en el mapa topográfico; 2) el error introducido por la distribución de medidas y densidad; 3) el error en el proceso de interpolación.

45. AGUILAR TORRES, F.J.; AGUILAR TORRES, M.A.; AGÜERA VEGA, F.; CARVAJAL RAMÍREZ, F.; SÁNCHEZ SALMERÓN, P.L. (2002). *Efectos de la Morfología del Terreno, Densidad muestral y Métodos de interpolación en la Calidad de los Modelos Digitales de Elevaciones*. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. INGEGRAF. Santander, España. // Se evalúa la calidad MDE teniendo en cuenta factores como la morfología del terreno, la densidad muestral y el método de interpolación empleado. Se trabaja con dos escalas muy distintas (microrelieve aprox. 3 m² y macrorrelieve aprox. 34,85 Ha). Se utiliza la Fotogrametría como medio de captura de la información. Del total de puntos obtenidos por Fotogrametría se selecciona una muestra para la validación posterior de los MDE, esta extracción la realiza de forma aleatoria. Esos puntos no participan en la elaboración del MDE, con lo que se contrasta la altitud medida por Fotogrametría con la altitud interpolada a partir del MDE. La exactitud global se estableció a partir del RMSE, previamente se comprobó que los residuos se aproximarán a una distribución normal, mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. El factor que presentó mayor incidencia fue la morfología del terreno, seguido de la densidad muestral y del método de interpolación. Se propone el desarrollo de funciones empíricas que faciliten el RMSE previsible para un MDE a partir del conocimiento de factores como la morfología del terreno, densidad de la muestra y método de interpolación. Así, la varianza de la pendiente, relacionada con la morfología del terreno, podría servir como estimador a priori del RMSE esperado en la generación del MDE, además de la densidad muestral y el método de interpolación empleado, entre otros parámetros que se pudieran añadir. Concluye que la relación entre el RMSE y la densidad muestral se ajusta a una función potencial decreciente.
46. HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. (2002). *Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 57, pp. 356-370 // Se describen los métodos de producción y validación de MDE producidos por estereomágenes ASTER. Se seleccionaron 4 zonas de estudio (Monte Fuji en Los Andes, San Bernardino en Los Ángeles y Huntsville en Alabama). Los desniveles totales de las zonas estudiadas son: 2.100 m, 2.200 m, 1.500 m y 300 m, respectivamente, con una extensión media en cada zona de unos 3.600 km². A partir de cartografía topográfica se obtienen los pdc con la exactitud correspondiente a la obtención de las coordenadas en los mapas. Las escalas varían entre E24k y E50k para la zona de Los Andes. Los RMSE obtenidos de la comparación de las coordenadas de los pdc y los MDE varían entre 7 m y 15 m. También se realiza un contraste con coordenadas obtenidas por GPS mediante el método de observación cinemático, y también se contrasta con pdc obtenidos de un MDE de mayor exactitud (USGS de 7,5"). Los resultados siempre están acordes con los obtenidos en la primera comparación, los RMSE están dentro del intervalo anteriormente indicado.
47. AGUILAR, F.J.; AGÜERA, F.; AGUILAR, M.A.; CARVAJAL, F.; SÁNCHEZ, P.L. (2003). *La Calidad de los Modelos Digitales de Elevaciones con Estructura de Matriz*

- Regular. Análisis y Modelización.* XIII Congreso Internacional sobre Herramientas y Métodos en Diseño de Ingeniería (XIII ADM – XV INGEGRAF) // Se evalúa la exactitud de los MDE obtenidos mediante Fotogrametría Digital Automática. Se analizan tres variables de influencia: la morfología del terreno (propone 7 morfologías diferentes, en varios lugares de España), la densidad muestral (para lo que a partir de 400 puntos seleccionados en cada zona realiza una selección muestral aleatoria estratificada, repitiendo 4 veces el proceso, por lo que obtiene 4 densidades diferentes), y el método de interpolación usado para convertir un modelo TIN (del que se parte) en una malla (con la que se trabaja). El objetivo es doble, se trata de poner en evidencia la notable influencia de la morfología del terreno y la densidad muestral y, por otra parte, se pretende elaborar un modelo empírico que prediga el RMSE cometido en la interpolación de un MDE malla, en función de la densidad muestral y la morfología del terreno. Para la elaboración del modelo empírico contempla varias características morfológicas de la superficie topográfica: pendiente media, varianza de la pendiente, desviación estándar de los vectores unitarios normales a la superficie, medida del ajuste de la superficie a un plano y dimensión fractal. Es importante destacar que todos los modelos evaluados presentan un excelente ajuste a los datos reales ($R^2 > 0.9$).
48. WECHSLER, S.P. (2003). *Perceptions of Digital Elevation Model Uncertainty by DEM Users*. URISA Journal. Vol. 15, Nº 2 pp.57-64 // Se establece una reflexión relativa a la necesidad de concienciación de los usuarios de MDE en torno al conocimiento de su exactitud y las consecuencias que ésta puede acarrear en los análisis posteriores. Se indica que el parámetro más empleado para expresar la exactitud de un MDE es el RMSE pero, al mismo tiempo, se indica que no es el parámetro más adecuado como un índice de calidad, ya que supone que la media de error es cero y que su distribución es normal. Se arguye que los controles típicos que se realizan, por comparación frente a pdc, no son métodos que estimen adecuadamente la exactitud del MDE, sino que simplemente son un control del MDE respecto a algunos puntos que se han podido emplear en su formación. Se realiza una encuesta on-line para obtener un resultado estadístico de la concienciación de los usuarios sobre el conocimiento y control que se pueda tener de la exactitud al trabajar con MDE. La mitad de los usuarios reconoce que su trabajo se ve afectado por la exactitud del modelo, por otro lado, el 21,5 % de los encuestados reconoce que la exactitud es muy importante y reconocen tenerla siempre en cuenta en el desarrollo de su trabajo.
49. REUTEBUCH, S.E.; MCGAUGHEY, R.J.; ANDERSEN, H.; CARSON, W.W. (2003). *Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy*. Canadian Journal of Remote Sensing. Vol. 29, Nº 5, pp. 527-535 // Se hace una revisión del sistema LiDAR para la elaboración de MDE. Se realiza un ensayo de evaluación de la exactitud de MDE obtenidos mediante LiDAR sobre diferentes cubiertas (vegetación alta y densa, vegetación poco alta y densa, vegetación menos densa, suelo totalmente desnudo). El trabajo se realizó en una zona de 5 km² en Washington (USA). Mediante pdc (medidos con técnicas topográficas) en cada uno de los tipos de cubiertas se obtuvieron las medias y desviaciones típicas de las diferencias entre las altitudes de los pdc y el MDE (interpoladas entre los nodos de la malla del MDE). La estimación resultante es $\mu = 0,22$ m, con una desviación típica de $\sigma = 0,24$ m. El peor resultado corresponde a zonas quebradas con vegetación espesa y alta.
50. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (2003). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners. Appendix A: Guidance for Aerial*

Mapping and Surveying. // Este documento presenta las directrices y especificaciones técnicas para los datos destinados a establecer las tasas de seguro de riesgo de inundación. La FEMA ha elegido para definir sus requerimientos de exactitud de los datos topográficos digitales, términos que están relacionados con el denominador de la escala del mapa impreso y con el intervalo entre curvas de nivel, equivalente a la terminología empleada en el estándar NMAS, pero también con referencias al NSSDA, asumiendo que los errores tienen una distribución normal, la NSSDA no indica qué hacer cuando los errores no siguen una distribución normal como en el caso de datos LiDAR.. También utiliza el método propuesto en el manual de la ASPRS (2001, *Digital Elevation Model Technology and Applications: The DEM Users Manual*) para aquellos datos cuyos errores no siguen una distribución normal.. La FEMA ha reducido los requerimientos de exactitud a dos opciones estándar para datos de elevación digital: 1) El equivalente a una equidistancia de dos pies (60,96 cm) para terrenos llanos (Exactitud en $z = 37,18$ cm al 95% del nivel de confianza, es decir, que el 95% de los datos debe tener un error inferior a 37,18 cm); 2) El equivalente a 4 pies de equidistancia (121,92 cm) para terrenos montañosos (Exactitud en $z = 73,15$ cm al 95% del nivel de confianza).

51. SUBRAMANIAN, K.S.; SINGH, A.; SUDHAKAR, M. (2003). *Evaluation of Digital Elevation Models created from different satellite images*. Map India in Technology Conference. // Evalúa la calidad de MDE generados a partir de IRS 1C, SPOT, ASTER bandas VNIR, Radarsat (SGF). Los MDE son obtenidos por métodos estereoscópicos e interferométricos. El artículo pone en valor la utilización de imágenes de satélite para la obtención de MDE por varias razones, comodidad, rapidez, resolución, coste, etc. Algunos MDE se contrastan de dos formas: 1ª) por medio de otros MDE de referencia, de igual resolución e igual ventana geográfica, y 2ª) mediante un conjunto de pdc obtenidos de cartografía de mayor escala. Se expone un interesante análisis sobre la forma de obtener el MDE a partir de cada sensor, mostrando un esquema del flujo de trabajo en cada uno. Los resultados finales son favorables al sensor ASTER y se deben a: i) la insignificante diferencia temporal en la toma del estereopar (solo cuatro segundos), ii) presenta una ratio B/H (Base / Altura) que rinde los mejores resultados y más consistentes sobre diferentes tipos de terreno, iii) el coste de las imágenes ASTER es unas tres veces menor que otros sensores.
52. HILTON, R.D.; FETHERSTONE, W.E.; BERRY, P.A.M.; JOHNSON, C.P.D.; KIRBY, J.F. (2003). *Comparison of digital elevation models over Australia and external validation using ERS-1 satellite radar altimetry*. Australian Journal of Earth Sciences. Vol. 50, pp. 157-168 // Se validan seis MDE globales diferentes y elaborados con los mismos datos de partida y que poseen diferentes resoluciones espaciales, y otros MDE que proceden del radar altimétrico ERS-1. Para todos los MDE la zona de trabajo es un área ubicada en Australia. Los MDE globales empleados son el GLOBE_V1 (Hastings & Dunbar, 1999), GTOPO30 (USGS, 1997), ETOPO5 (NGDC, 1988), TerrainBase (Row et al. 1995), JGP95E (Lemoine et al. 1998) y GEODATA de 9". GEODATA es un producto australiano y posee 5,1 millones de puntos obtenidos a partir de mapas topográficos a E100k, la precisión se estima en $RMSE = 7,5$ m. El proceso consiste en realizar comparaciones entre MDE, adaptando en algún caso la resolución de los MDE de mayor resolución espacial a los de menor. Este análisis no da resultados concluyentes. Además, se realiza una comparación de

cada MDE con los datos altimétricos del radar de ERS-1, siendo el MDE de GEODATA el que mejor resultados ofrece. Se emplearon 5.264.617 puntos en la comparación GEODATA frente ERS-1, obteniendo los siguientes valores en las diferencias de altitudes: $\mu = 2$ m y $\sigma = 27$ m.

53. HODGSON, M.E.; JENSEN, J.R.; SCHMIDT, L.; SCHILL, S.; DAVIS, B. (2003). *An evaluation of LiDAR and IFSAR -derived digital elevation models in leaf- on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs*. Remote Sensing of Environment, vol. 84, pp. 295-308 // Se evalúan cuatro métodos basados en Teledetección para la obtención de MDE. El LiDAR aerotransportado e InSAR son las dos técnicas empleadas para la confección de los MDE. Estas dos técnicas se compararon a dos métodos: uno fotogramétrico (mediante Gestalt Photomapper) y otro de digitalización (paso de curvas de nivel a MDE malla), ambos usados por el USGS para la formación de sus productos MDE. La zona de trabajo es una cuenca propensa a inundaciones en Carolina del Norte (USA). Mediante observaciones GPS y Topografía clásica se obtuvieron 1.470 pdc en cinco tipos de cubiertas del terreno diferentes (hierba baja, hierba alta, arbustos, pino, árboles caducos, mezcla). La recogida de información para los MDE LiDAR e InSAR se realizó en una época en que la vegetación estaba vestida con sus hojas. Los resultados para el RMSE en cada tipo de cubierta y conjunto de datos (LiDAR, InSAR, USGS Level 1 y USGS Level 2), son los siguientes: para hierba baja RMSE=(33,3; 306,2; 519,5; 142,5) cm, para hierba alta el RMSE=(37,1; 173,6; 482,6; 141,4) cm; para arbustos RMSE=(153,4; 435,7; 882,1; 170,6) cm.; para pino RMSE=(45,7; 993,5; 528,0; 144,6) cm; para árboles caducos RMSE=(122,2; 1503,6; 794,6; 200,2) cm; y para la zona de mezcla RMSE=(113,4; 1099,9; 1005,9; 136,4) cm. Se observa el efecto de la altura de la vegetación en InSAR produciendo unos valores de error bastante elevados, algo parecido se observa en LiDAR aunque no de una forma tan destacada.
54. KIDNER, D.B. (2003). *Higher-order interpolation of regular grid digital elevation models*. International Journal of Remote Sensing, vol. 24, pp. 2981-2987 // Se evalúan algunos algoritmos de interpolación de orden superior. La hipótesis es que los algoritmos de interpolación de orden superior son siempre más exactos que el popular algoritmo lineal o bilineal. Para ello se evalúa la exactitud de MDE remuestreados con mayores pasos de malla. El autor considera que el método de interpolación empleado es el factor más influyente en la exactitud final de cualquier MDE. En un conjunto de puntos distribuidos de forma aleatoria o regular, con altitud conocida, se puede definir una función $z=f(x,y)$, la cual reproduce la situación del valor de Z (altitud) en cada punto dado en la nube, un método de interpolación muy empleado de éste tipo es el polinomial bivariable $z_i = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^n a_{kl} x^k y^l$, siendo a_{kl} los coeficientes del polinomio. En este trabajo se consideran polinomios de grado 0 a 5. La función más simple que asegura un buen suavizado de la superficie z_i es la superficie biquintica, que se calcula usando las cuatro altitudes de los vértices de la malla más próximos, junto con las ocho derivadas ($z'_x, z'_y, z''_{xx}, z''_{xy}, z''_{yy}, z'''_{xxy}, z'''_{xyy}, z''''_{xxyy}$), las primeras derivadas expresan la pendiente de la superficie en dirección x e y, mientras la segunda derivada representa la pendiente en ambas direcciones. La posibilidad de determinar el rendimiento de los algoritmos de interpolación muchas veces se puede ver enmascarada con los errores propios de los datos con los que se forma el MDE, ya que la comparación directa entre MDE de diferentes espaciados de malla y adquiridos

por diferentes fuentes no sería viable. En este caso, se cuenta con tres MDE del OS de E50K, cada MDE es una malla de 801×801 puntos con de 50×50 m de equiespaciado, en tres zonas muy diferentes: terrenos quebrados en Escocia, colinas onduladas de la frontera galesa y terreno suave en Midlands (Inglaterra). Se realiza un remuestreo de malla a 100×100 m, 200×200 m y 400×400 m. En cada remuestreo se van aplicando todos los algoritmos de interpolación indicados y calculando el RMSE entre las altitudes interpoladas y las originales. Los resultados muestran que cualquier algoritmo que use más de los cuatro vértices más próximos al punto interpolado será más exacto que la interpolación bilineal. La naturaleza o morfología del terreno influye en una variación del RMSE en un 20% como máximo. Ningún algoritmo de los empleados es consistentemente más exacto que los otros. Los que usan mayor número de vértices en la vecindad tienden a ser más exactos, sobre todo los que usan 16 o, preferiblemente, 36 vértices.

55. KRAUS, K.; BRIESE, C.; ATTWENGER, M.; PFEIFER, N. (2004). *Quality Measures for Digital Terrain Models*. ISPRS XXth Congreso, Estambul; Commission II, Vol.XXXV, Part B/2, pp. 113-118 // Los autores consideran que gran parte de la literatura ofrece cifras de exactitud de MDE que se manejan como cajas negras, pues no se sabe bien cuáles son los factores que influyen en su cálculo. Se plantean dos métodos para la evaluación de la calidad; un primer método de carácter estocástico y empírico donde se estima, a priori, una exactitud para el MDE (basándose en el conjunto de datos originales con los que se forma el MDE), que luego se puede contrastar con la exactitud obtenida de comparar las altitudes del MDE frente a pdc. El segundo método propone un procedimiento geométrico para la estimación de la exactitud: se establecen las diferencias entre la altitud en un punto del MDE y la altitud que le correspondería a esa posición teniendo en cuenta las altitudes de los puntos más próximos y la curvatura del terreno. En el trabajo se han empleado MDE obtenidos por ALS y MDE obtenidos por Fotogrametría analítica. Como conclusión indica algunas de las cuestiones que deben responderse mediante pruebas empíricas para que el método propuesto funcione correctamente en la estimación de un valor de exactitud: tamaño apropiado para la unidad de análisis (estimada a partir de la densidad del conjunto de datos originales), estimación de σ_{apriori} para diferentes métodos de captura de datos, elección de la incertidumbre de aproximación, usando el procedimiento basado en geometría, donde las áreas que exceden del radio de curvatura se clasifican como inútiles.
56. BUCKLEY, S.J.; MITCHELL, H.L. (2004). *Integration, validation and point spacing optimisation of digital elevation models*. The Photogrammetric Record, vol. 19, nº 108, pp. 277-295 // Se analizan los errores sistemáticos, atípicos y aleatorios que pone de manifiesto la integración en un MDE de diferentes fuentes de datos. El ejemplo que se expone se desarrolla en la desembocadura del río Hunter (Australia). Se propone un método para disminuir y eliminar de forma automatizada algunos errores atípicos y sistemáticos en la integración de MDE obtenidos por métodos fotogramétricos y ALS. El método consta de los siguientes pasos: 1) comparación inicial de los MDE de entrada y cálculo de discrepancias iniciales por diferencias entre MDE y análisis estadístico; 2) filtrado de puntos no pertenecientes al suelo y localización de grandes discrepancias sistemáticas; 3) emparejamiento de las superficies, minimización de las diferencias verticales; 4) unión de los MDE, una vez en el mismo sistema de referencia,

y detectadas las diferencias y errores atípicos por varias vías (localizados en parches, picos a través de la superficie, valores contradictorios); 5) filtrado y reducción de puntos, donde se procede a la optimización de la unión. En la zona de estudio las diferencias iniciales entre los MDE de entrada y los puntos de control dan los siguientes valores: MDE por métodos fotogramétricos $\mu=-0,115$ m, $\sigma=0,157$ m; MDE por Láser Escáner $\mu=-0,072$ m, $\sigma=0,106$ m. Se emplearon 50 pdc en ambos casos. Tras la unión de los MDE los valores que se obtienen son los siguientes: MDE fotogramétrico transformado $\mu=-0,025$ m, $\sigma=0,099$ m; MDE por Láser Escáner transformado $\mu=-0,135$ m, $\sigma=0,099$ m.

57. CHANG, H.C.; GE, L.L.; RIZOS, C. (2004). *Assessment of digital elevation models using RTK GPS*. Journal of Geospatial Engineering, Vol. 6, nº 1, pp. 13-21 // Se enumeran las principales tecnologías disponibles para la captura de datos para la formación de MDE (Fotogrametría, ALS, Interferometría Radar y GPS RTK). El objetivo del artículo es comparar la incertidumbre de estas tecnologías con respecto a la tecnología GPS RTK. Para este fin, se realizan tomas de datos en varias carreteras, adquiriendo perfiles con GPS RTK. Posteriormente se contrastan con los perfiles derivados de los MDE obtenidos por las otras fuentes. Las medidas GPS se autocontrolaban midiendo las trazas de las carreteras dos veces en direcciones opuestas, lo que ofrece una indicación de su incertidumbre. En el contraste de los 4 perfiles obtenidos por las distintas fuentes frente al que se obtiene con GPS, se obtiene el RMSE de cada perfil, resultando que la tecnología ALS es la más próxima al GPS dando valores de RMSE de entre 0,09 a 0,30 m, mientras que la Fotogrametría e InSAR se disparaban por encima de los dos metros.
58. CUARTERO, A.; FELICÍSIMO, A.M.; ARIZA, F.J. (2004). *Accuracy of DEM generation from Terra-ASTER stereo data*. Proceedings XXth Congress ISPRS 2004. Estambul. Commission VI, WG VI/4. Vol. XXXV, part B5 // Se analiza la exactitud de dos MDE obtenidos a partir de las imágenes estereoscópicas ASTER y generados por métodos automatizados de emparejamiento (matching) con dos herramientas diferentes (OrthoBase PRO y OrthoEngine). La zona de estudio es de 23x28 Km (Granada, España), y posee una morfología muy variada y compleja. El método se basa en el principio fotogramétrico de colinearidad en la orientación de imágenes, para cuyo fin se utilizaron 15 puntos de apoyo del terreno. La exactitud fue evaluada empleando 315 pdc repartidos de forma aleatoria por toda el área de estudio, estos puntos fueron medidos por técnicas DGPS. Se construyeron 55 MDE a partir de imágenes ASTER. Los valores de exactitud calculados para los MDE obtenidos a partir de Ortho Base son: $\mu=9,7$ m, $\sigma=28,8$ m y RMSE= 34,8 m.; para los MDE obtenidos a partir de Ortho Engine son: $\mu=-1,5$ m, $\sigma=12,6$ m, RMSE= 12,5 m.
59. ASPRS Guidelines (2004). *Vertical Accuracy Reporting for LiDAR Data*. ASPRS LiDAR Committee (PAD). Martin Flood. // Este documento establece los requisitos que la ASPRS impone a los informes de exactitud de altitudes cuando se usan datos generados por tecnología LiDAR. Un MDE procedente de datos LiDAR ha pasado un proceso de construcción de un TIN, con el fin de obtener curvas de nivel, o de una interpolación para obtener una malla, debido a esto existe una incertidumbre añadida que se ha de tener en cuenta a la hora de expresar la exactitud vertical del MDE resultante. Se establece que la exactitud del MDE debe considerar, a diferencia de otras fuentes de obtención de datos, la naturaleza de la cubierta del suelo, dado el diferente comportamiento del LiDAR en función de esa cubierta (suelo urbano,

bosque, suelo desnudo, etc.). Se aconseja establecer zonas de prueba y cuidar la elección de puntos de control, estos últimos deben estar en zonas lo más llanas posibles para minimizar que el error horizontal del pdc provoque grandes errores de altitud, como ocurriría en zonas de fuerte pendiente. Para ASPRS la fuente de datos independiente de mayor exactitud debe ser, al menos, tres veces más exacta que el conjunto de datos a evaluar. La ASPRS establece tres aspectos críticos en el cálculo de la exactitud: 1) recopilación de datos de diferentes productores para la formación de un único MDE, 2) la variación topográfica puede requerir diferentes criterios de exactitud en diferentes tipos de terreno y 3) finalmente, la cubierta del terreno. La ASPRS recomienda utilizar un mínimo de 20 pdc (preferiblemente 30) en cada una de las categorías de cubiertas del suelo representativas dentro del área de estudio, según se indica esto provee mayor robustez en la caracterización de la distribución de la exactitud y ayuda a identificar los errores sistemáticos. Se señala que en los metadatos se debe indicar la clasificación de cubiertas del terreno establecidas, ya que esto dependerá de varios factores, entre ellos el nivel de precisión en la calidad. Se puede recurrir incluso a clasificaciones ya establecidas, p.ej. *Anderson, National Land Cover Dataset*. Se aconseja la selección de los pdc en zonas llanas o con poca pendiente y, si es posible, alejados de zonas de cambio de pendiente. Aconsejan analizar los errores sistemáticos, que no suelen seguir una distribución normal, así como los atípicos, ya que éstos pueden ser indicativos de algún error sistemático incipiente en algún proceso de la formación del MDE. Se acepta generalmente que, en terreno desnudo (sin vegetación), los errores suelen ser aleatorios, sin embargo, en terreno con vegetación o edificaciones los errores suelen incluir errores sistemáticos. El informe de la exactitud vertical se divide en dos: exactitud vertical fundamental (con pdc situados en terreno despejado o suelo desnudo, expresando la exactitud al 95% del nivel de confianza como una función del RMSE), y exactitud vertical suplementaria y consolidada (calculada sobre cubiertas vegetales, etc. o combinación de cubiertas, en ellas no se puede asumir una distribución normal de los errores y se adopta un método de expresión no paramétrico basado en el percentil 95). Los chequeos de exactitud vertical suplementaria deben estar acompañados, a ser posible, por chequeos de exactitud vertical fundamental, utilizando puntos en zonas despejadas dentro de la zona o cubierta a evaluar, salvo que no se pueda disponer de un número de pdc suficientes para el chequeo, en esos casos se hará lo que sea posible, siendo explicada esta situación en los metadatos. La exactitud vertical consolidada obedece a cuando se dispone de 40 pdc o más, para dos o más de las categorías de cubiertas del terreno más extensas, en las que se ha clasificado toda la zona de estudio. Finalmente, la ASPRS solicita a los productores de datos LiDAR una exactitud horizontal esperada, determinada a partir de estudios del sistema u otros métodos.

60. BONIN, O.; ROUSSEAU, F. (2005). *Digital Terrain Model Computation from Contour Lines: How to Derive Quality Information from Artifact Analysis*. *GeoInformática* Vol. 9(3), pp. 253-268 // Analiza la calidad de los MDE empleando las líneas fundamentales del relieve (vaguadas y divisorias, básicamente). Analiza los problemas que aparecen debido a la subestimación de la altitud en las zonas de divisoria y a la sobreestimación de la altitud en las zonas de vaguada. Se propone valorar el impacto que tienen estos problemas de modelización, en las vaguadas y divisorias, en los parámetros derivados de pendiente y orientación del terreno. Se usan

algoritmos de corrección de estos problemas (triángulos que unen dos curvas de nivel no consecutivas, triángulos contruidos con una única curva de nivel, densificación de información en lugares conflictivos). En el caso de las divisorias el mejor método es la densificación de datos. Se obtienen mapas de distribución de las exactitudes en función de un análisis morfológico del terreno. Los tres MDE con los que se trabaja se obtuvieron por la digitalización de curvas de nivel. La zona de trabajo está situada en Avignon (Francia). El MDE LiDAR tiene una densidad de $1/5 \text{ p/m}^2$ y el MDE calculado a partir de curvas digitalizadas posee una equidistancia de 5 m. A partir de ambos se obtuvieron MDE malla de 5×5 m, para compararlos. Los MDE se procesaron con tres algoritmos de interpolación diferentes a partir de los puntos digitalizados sobre las curvas de nivel (ponderación inversa a la distancia, spline regularizado con tensión y kriging). También se obtuvieron dos MDE por triangulación, uno de ellos con un método de eliminación de atípicos (triangpro). Al comparar con el MDE de mayor exactitud resulta que los obtenidos por triangulación son mejores en términos de exactitud que los obtenidos por interpolación, también en el parámetro de la pendiente. Sin embargo, todos los MDE son muy similares en términos de orientación. Se enfatiza la necesidad de dar parámetros de calidad local, ya que un parámetro de calidad cuantitativo global del MDE no representa la realidad del propio MDE. El artículo no facilita datos cuantitativos concretos de lo expuesto.

61. CARLISLE, B.H. (2005). *Modelling the Spatial Distribution of DEM Error*. Transactions in GIS. Vol. 9, nº 4, pp. 521-540 // Se propone una nueva técnica para crear un modelo de distribución espacial de la calidad de MDE (una superficie de exactitud) La técnica está basada en la hipótesis de que la distribución y la magnitud de la exactitud de un MDE están relacionadas a las características morfológicas del terreno. Se generan un conjunto de variables derivadas del MDE: elevación, gradiente de la pendiente, orientación, curvatura plana y vertical, etc. Se emplean datos del OS de una zona del Norte de Gales de 1×2 Km. Se generan tres MDE a partir de los datos originales, cambiando el método de interpolación (Inversa Ponderada a la Distancia con un peso de 1, con un peso de 5 y “*Spline with tension*”). Se evalúan las exactitudes de estos tres MDE utilizando 106 puntos medidos por técnicas GPS y mayor exactitud. Los resultados son RMSE=5,11 m (inversa a la distancia ponderada con peso 1), RMSE= 3,96 m (inversa a la distancia ponderada con peso 5), RMSE= 3,78 m (método de “*Spline with tension*”). Se calcularon los coeficientes de correlación entre cada parámetro del terreno obtenido y las discrepancias en altitud (diferencia entre MDE y datos GPS). El método de interpolación de “*Spline with tension*” es el que da mejor coeficiente de correlación para los distintos parámetros. Posteriormente se relacionaron las diferencias de altitudes, entre los MDE y los pdc, con los cuadrados y cubos de los parámetros, para comprobar la existencia de relaciones no lineales, que existía en algún caso como la curvatura horizontal, etc. Finalmente se generó un modelo de regresión conjugando los parámetros, al cuadrado o al cubo, que mejor se adaptaban a un ajuste mínimo cuadrático, el ajuste de regresión da un valor de $R^2 = 0,827$. Este mismo estudio se aplicó en otra zona algo más grande de Groenlandia obteniendo otro modelo de regresión, por lo que una de las conclusiones es que la relación entre la exactitud del MDE y las características morfológicas no tiene un funcionamiento similar en todos los lugares, y es una característica del terreno. Otro de los factores que influyen son el espaciado de malla y el método de interpolación. La fiabilidad de la exactitud asignada a la superficie del MDE es limitada, debido a

limitaciones en el tamaño y distribución de la muestra de puntos GPS, la calidad de las variables derivadas del MDE y la presencia de componentes de la incertidumbre no sistemáticos.

62. OKSANEN, J.; SARJAKOSKI, T. (2005). *Error propagation of DEM-based Surface derivatives*. Computers & Geosciences, Vol. 31, pp. 1015-1027 // Se muestra cómo los errores aleatorios de un MDE son propagados a los siguientes parámetros: orientación, pendiente y la delineación automática de la cuenca de drenaje. La propagación del error se exploró usando métodos numéricos y analíticos. En ambos métodos se modeló el error de un MDE como un proceso aleatorio Gaussiano estacionario de segundo orden. Se usaron 32 escenarios reales de modelos de error. Los escenarios se basaron en modelos de autocorrelación espacial Gaussiana y exponencial. Como se esperaba, un incremento en el error del MDE provoca un incremento en el error de los parámetros derivados. Sin embargo, contrario a lo esperado, el modelo de autocorrelación espacial parece tener efectos diferentes en el análisis de propagación. En los parámetros derivados, tales como pendiente y orientación, el error máximo de los resultados ocurre cuando el alcance de la autocorrelación espacial del error es más o menos igual al tamaño de la ventana de cálculo del parámetro o aspecto. Hasta ahora el uso de modelos de error no correlados espacialmente se ha considerado como el peor escenario, pero según los autores esta opinión puede ser puesta en duda ya que ninguna de las variables derivadas del MDE investigadas en el estudio tuvo variación máxima con error aleatorio no correlado espacialmente.
63. ZHU, C.; SHI, W.; LI, Q.; WANG, G.; CHEUNG, T.C.K.; DAI, E.; SHEA, G.Y.K. (2005). *Estimation of average DEM accuracy under linear interpolation considering random error at the nodes of TIN model*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 26, n° 24, pp. 5509-5523 // Se utiliza la probabilidad y la interpolación para estimar el error de un MDE que se deriva de un TIN. El error en un punto cualquiera P , en el interior de un triángulo del TIN, se calcula mediante las leyes de propagación de varianza. El error es dependiente del error en los nodos e independiente del tamaño del triángulo. Se deja la puerta abierta a continuar la investigación suponiendo el error de los nodos como dependientes unos de otros.
64. SHI, W.Z.; LI, Q.Q.; ZHU, C.Q. (2005). *Estimating the propagation error of DEM from higher-order interpolation algorithms*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 26, n° 14, pp. 3069-3084 // Establece dos factores de error en un MDE: 1) error de la superficie generada, que viene motivado por el algoritmo de interpolación aplicado; 2) error propagado a partir de los nodos originales de la red. El estudio se centra en el segundo tipo de error, y utiliza los algoritmos de interpolación bicuadráticos y bicúbicos sobre MDE con estructura de malla. Se desarrollan fórmulas de propagación del error para las interpolaciones bicuadráticas y bicúbicas, en términos de error cuadrático medio (MSE) en la altitud. Se encontró que los errores de propagación individuales, tanto en los modelos bicuadráticos y bicúbicos, son idénticos entre sí, al igual que en el modelo bilineal. La combinación de la fórmula que se desarrolla en el artículo y el resultado de Kidner (ver referencia 48), quien encontró que tanto la interpolación bicúbica, modelo bicuadrático y bicúbico, reduce el RMSE del error hasta un 20% con respecto a la interpolación bilineal, que es uno de los más utilizados por su sencillez. Concluye que los algoritmos de interpolación bicuadrático y bicúbico son más exactos que la interpolación bilineal en términos de error total, que

- incluye tanto la propagación del error como el error del modelo de la superficie del MDE generado.
65. KAY, S.; SPRUYT, P.; ZIELINSKI, R.; WINKLER, P.; SZABOLCS, M.; GYULA, I. (2005). *Quality checking of DEM derived from satellite data (SPOT and SRTM)*. 25th EARSeL Symposium on Global Developments in Environmental Earth Observation from Space, Porto, Portugal. Junio 2005. // Evalúa la calidad de MDE obtenidos a partir de la plataforma SPOT HRS y SRTM, ambos especifican un RMSE inferior a 5 m en altitud. La zona de estudio se sitúa al sur de Budapest, con un área total de 13.000 Km² y una altitud máxima de 678 m. Se emplearon unos 55.000 pdc, obtenidos a partir de cartografía del servicio cartográfico húngaro (E10k), y a partir de nivelaciones trigonométricas, estos datos conforman MDE de alta resolución (malla de 5×5 m, con un RMSE de 0,7 m en altitud). La comparación altimétrica de los MDE con estos datos resultan en un RMSE= 3,03 m, en el caso de MDE obtenidos a partir de imágenes SPOT, y en un RMSE= 2,64 m para los procedentes de SRTM, ambos en áreas agrícolas con pendientes inferiores al 20%. En las zonas urbanas empeoran ligeramente tanto para SRTM como para SPOT.
 66. REINARTZ, P.; MÜLLER, R.; LEHNER, M.; SCHROEDER, M. (2005). *Accuracy analysis for DSM and orthoimages derived from SPOT HRS stereo data using direct georeferencing*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. Vol. 60, pp. 160-169 // Se destacan las ventajas que tiene el sensor HRS de SPOT5 para producir MDS de alta resolución con características similares a las de SRTM X-band, o incluso mejores. Se evalúa la calidad de ortoimágenes y MDS derivados sin el uso de puntos de apoyo en el terreno, haciendo uso de datos auxiliares directos (giroscopio, sistema DORIS de localización,...), y se comprueba la mejora con la introducción de unos pocos puntos de apoyo en terreno. Las zonas de ensayo están situadas en Bavaria (Alemania) y Cataluña (España), zonas de 40×55 Km en ambos casos, y cubriendo un amplio abanico de usos del suelo. Los MDS se comparan con MDE de mayor exactitud y resolución. Con sólo la georreferenciación directa se obtienen unas diferencias entre modelos de $\mu = 5$ a $\mu = 10$ m, con $\sigma = 2$ a $\sigma = 4$ m. La exactitud depende de la pendiente del terreno y del uso a que se destina, en las áreas forestales las desviaciones estándar son significativamente mayores, sobretodo en el caso de Bavaria (12 m), ya que la altura de los árboles introduce un sesgo en el cálculo de las diferencias entre modelos. Finalmente se observa una ligera mejora con la introducción de unos pocos puntos de apoyo terreno, pero poco significativa.
 67. ECKERT, S.; KELLENBERGER, T.; ITTEN, K. (2005). *Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from aster data in mountainous terrain*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, Nº 9, pp. 1943-1957 // Se pretende obtener MDE que cubran las necesidades de estudio y monitorización de la vegetación en la zona de la Patagonia (Andes), ya que los patrones de respuesta espectral de los diferentes tipos de vegetación dependen en gran medida de la topografía. Para ello se emplean datos ASTER en Suiza (por similitud morfológica), en una zona con un desnivel total de 1.000 m, y otra zona en los Alpes con un desnivel total de 3.300 m, cubriendo una zona de 14.400 km². Se obtuvieron MDE de la misma zona con mayor exactitud y por diferentes metodologías y resoluciones. El primero fue un MDS obtenido a partir de datos InSAR, con una resolución de malla de 1 m, y con una incertidumbre en altitud de 0,70 m. El segundo fue un MDE obtenido a partir de la digitalización de las curvas de nivel de los mapas topográficos a E25k (Oficina Federal

Suiza de Topografía), con un valor de RMSE de 2 a 4 m en zonas llanas y de 4 a 10 m en zonas de alta montaña. El tercero fue un MDS creado con datos interferométricos de ERS1-2 SAR, con un valor de RMSE de 7 m en zonas llanas y de hasta 15 m en zonas montañosas. Se compararon los MDE realizando un análisis estadístico basado en el cálculo del RMSE y de la diferencia de altitud media absoluta. Finalmente se analizan los resultados estableciendo correlaciones entre los resultados y las diferentes cubiertas vegetales analizadas, así como la diferente distribución de puntos de control terreno empleados en la generación de MDE, centrandó también la atención en los parámetros y filtrados en postproceso realizados sobre los MDE. Se concluye que las discrepancias entre modelos van desde un valor de $RMSE < 10$ m, en zonas llanas, hasta 30 m en zonas de alta montaña.

68. W. KAREL, N. PFEIFER, C. BRIESE (2006) *DTM Quality Assessment*. ISPRS Technical Commission II Symposium, Vienna, 12-14 July 2006. // Se establecen criterios para la evaluación de la calidad de MDE (obtenidos por medios automáticos, Láser escáner aerotransportado, Interferometría radar, etc.). Se consideran: la propagación de errores desde los datos brutos para la formación del MDE, y la distribución espacial de los datos (la calidad de los datos por zonas, debido a la existencia de heterogeneidad en su toma directa del terreno). Se distingue entre calidad global y local del MDE, en la primera influyen tanto los datos de entrada como el proceso de generación del MDE, y en la segunda, que se controla a partir de las diferencias entre el MDE y los pdc, se establece que la mediana de las diferencias de altitud puede ser un indicador robusto para los errores sistemáticos en altitudes. Por último, en la evaluación de la calidad externa, se proponen algunas fórmulas empíricas, ya que el coste de toma de puntos de control sobre el terreno para áreas extensas puede ser elevado, las fórmulas están en función de la pendiente del terreno (ángulo α de inclinación) y la altitud de vuelo (en el caso de datos procedentes de Fotogrametría); y de la pendiente y el número de puntos por m^2 en el caso de ALS.
69. QIMING ZHOU, XUEJUN LIU, YIZHONG SUN (2006). *Terrain complexity and uncertainties in grid-based digital terrain analysis*. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, N° 10, pp. 1137-1147 // Se estudia la relación entre la complejidad del terreno (morfología) y los resultados de un análisis cualquiera del terreno a partir de MDE. En este estudio se emplea el algoritmo de las diferencias finitas de tercer orden para el cálculo de pendientes y orientaciones a partir de una ventana deslizante de 3×3 . Para poner en práctica el análisis se han empleado superficies matemáticas (elipsoide, superficie sintética de Gauss), exentas de error. Se observa una correlación negativa entre la pendiente del terreno o su rugosidad morfológica y los valores de RMSE de la pendiente y orientación; a mayor pendiente del terreno menor RMSE, siendo más sensible el efecto en la orientación que en la pendiente. Como consecuencia de lo anterior las zonas llanas son las más afectadas en los modelos derivados de pendiente y orientación. En general, cuando el terreno es más escarpado con pendientes fuertes, la incertidumbre de los parámetros derivados (pendiente y orientación) es bastante baja.
70. OKSANEN, J. (2006). *Digital Elevation Model Error in Terrain Analysis*. Publications of the Finnish Geodetic Institute. Faculty of Science. University of Helsinki. University Press // Tesis doctoral que considera: 1) ¿Cómo se debería evaluar e informar de la calidad de un MDE para que sea útil a los usuarios de MDE?; 2) ¿Cómo

se deben tener en cuenta los metadatos concernientes a la calidad de un MDE en un análisis del terreno?; y 3) ¿Cuál es la influencia de la calidad de MDE en el análisis del terreno? Investiga la propagación del error en análisis del terreno basados en MDE mediante un método consistente en tres fases. Primero utiliza métodos de visualización para la detección de errores atípicos, estos errores atípicos introducen sesgo en un análisis posterior. Se podrían utilizar métodos automáticos para la detección de estos errores, pero la percepción humana en la interpretación de la morfología del terreno puede ser de más ayuda en la detección de errores atípicos, para este fin se pueden emplear mapas sombreados, perfiles, etc. Segundo caracteriza la incertidumbre del MDE incluyendo la información de su distribución y estructura. Para conocer la estructura de la incertidumbre se emplean variogramas omnidireccionales, y se revela que a distancias superiores a 300 m se vuelve desestructurado. Por otro lado, se obtuvieron relaciones entre la morfología topográfica y los variogramas por medio de un análisis de correlación. Los atributos del terreno que ofrecían los valores más altos y bajos de correlación con el semivariograma fueron la pendiente media, la desviación estándar de la curvatura y el índice de vegetación. Tercero realiza el análisis de la propagación de la incertidumbre sobre modelos derivados (p.ej. pendiente, orientación, etc.). El análisis de la propagación de la incertidumbre se hizo usando un método analítico y el método de Monte Carlo. En este análisis se comprueba que el aumento de incertidumbre en un MDE aumenta las incertidumbres en los modelos derivados, no siendo comprobada la opinión de otros autores de que en el caso de un modelo de incertidumbre no correlado espacialmente sería el peor escenario en la propagación de incertidumbres en modelos derivados del MDE. En la tesis se trabaja con MDE de gran escala.

71. FISHER, P.F.; TATE, N.J. (2006). *Causes and consequences of error in digital elevation models*. Progress in Physical Geography. Vol. 30, N° 4, pp. 467-489 // Se realiza una revisión sobre las fuentes y la naturaleza de los errores que afectan a los MDE. Se indican y describen los estadísticos más empleados en la caracterización de los errores en MDE (RMSE y desviación estándar σ). Siguiendo los estudios de Shearer (1990) y Li (1992) se revisan las fuentes de error: 1) incertidumbre posicional, distribución y densidad de los datos con los que se forma el modelo; 2) el método de interpolación; y 3) la descripción o modelaje de la morfología final del terreno. Se analiza la literatura en cuanto a la propagación del error de MDE en parámetros derivados, y se revisan dos métodos, por un lado las series de Taylor, y por otro, la simulación de Monte Carlo. Se enjuician los métodos de corrección de errores y se plantea la idoneidad para su uso en determinadas aplicaciones, esto último es difícil de responder ya que, según los autores, en este sentido no se ha progresado mucho. Finalmente se identifican las prioridades de las investigaciones futuras, relacionadas con la evaluación de la idoneidad de MDE para su uso en una aplicación determinada.
72. QUESADA, M.E.; MARSIK, M. (2006). *Evaluación de la precisión vertical de un modelo de elevación digital*. Revista Cartográfica, n° 82, pp. 137-156 // Se evalúa la precisión de MDE obtenidos por digitalización de curvas de nivel de cartografía E50k y posterior interpolación. Contrasta los MDE en ocho zonas diferentes de Costa Rica utilizando 950 pdc. Posteriormente realiza un análisis de su distribución donde se pone de manifiesto la existencia de errores sistemáticos. Una de las conclusiones es que debería incluirse una prueba de normalidad de los datos.

73. OKSANEN, J.; SARJAKOSKI, T. (2006). *Uncovering the statistical and spatial characteristics for fine toposcale DEM error*. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 20, nº 4, pp. 345-369 // El objetivo es caracterizar los detalles estadísticos y de distribución espacial de los errores en MDE derivados de cartografía topográfica a gran escala. Son MDE malla de 5×5 m a 50×50 m, y útiles para aplicaciones a escalas en el rango de E10k a E50k. Las incertidumbres se determinaron usando datos ALS con mayor exactitud. Los resultados muestran que la autocorrelación espacial de la incertidumbre en MDE de escalas de detalle o grande es el resultado de una combinación compleja de componentes aleatorios y sistemáticos, y que su modelado apropiado por métodos geoestadísticos es problemático debido a que en áreas de pequeña extensión, se aplica la suposición de la estacionariedad. La descripción de la distribución de incertidumbre del MDE mediante un parámetro único de dispersión no fue posible, debido a la gran cantidad de atípicos que se encontraron, esto sugiere que se debe utilizar unos descriptores de distribución del error robustos (tales como mínimo, máximo, mediana, cuartiles, recorrido intercuartil y deciles), además de los descriptores convencionales.
74. AGUILAR, F.J.; AGUILAR, M.A.; AGÜERA, F.; SÁNCHEZ, J. (2006). *The accuracy of grid digital elevation models linearly constructed from scattered sample data*. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 20. Nº 2 pp. 169-192 // Se desarrolla un modelo teórico-empírico para evaluar la exactitud de MDE utilizando el RMSE. Se basa en los trabajos realizados por Li (1993) (ver referencias 7 y 8). Se parte de una nube de puntos 10.000 puntos obtenidos por Fotogrametría digital y repartidos en las distintas zonas de trabajo, de los cuales se reservan 73, también repartidos en las distintas zonas de trabajo. Las zonas de trabajo cubren morfologías del terreno variadas, se contemplan un total de 8 zonas, con una extensión cada una de 198×198 m, en la zona de Macael y Níjar (Almería). A partir de los puntos aleatoriamente distribuidos se obtienen MDE con un espaciado de 2×2 m. El modelo propuesto depende de la incertidumbre de los datos fuente y de la incertidumbre originada por la interpolación. En este trabajo se supone despreciable la primera incertidumbre, por lo que se centra en la formulación de la segunda, conocida como incertidumbre por *pérdida de información*. Para modelar esta incertidumbre se tiene en cuenta variables como la densidad de la muestra para la obtención del MDE y la rugosidad del terreno, la cual se evalúa a través de variables derivadas (pendiente media, desviación estándar de la pendiente, desviación estándar de vectores unitarios perpendiculares a la superficie topográfica, desviación estándar de la diferencia de altura entre puntos de la malla adyacentes en el MDE). La parte empírica del modelo presenta una morfología basada en el producto de dos funciones potenciales, una incrementa con la rugosidad del terreno y otra decrece con la densidad de la muestra de puntos. Finalmente se establece un modelo matemático que integra todas las variables comentadas. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el modelo empírico basado en el descriptor del terreno *desviación estándar de la diferencia de altura entre puntos de la malla adyacentes en el MDE*, es uno de los que mejor reproduce la incertidumbre del MDE observado en la mayoría de las morfologías del terreno.
75. CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUÉDOIS, S.; SILVERA, N.; PHACHOMPHON, K. (2006). *Accuracy of interpolation techniques for the*

derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. Geomorphology, vol. 77, pp. 126-141 // Se evalúan técnicas de interpolación en paisajes naturales de diferentes morfologías y sobre un gran rango de escalas de trabajo. Se seleccionan seis lugares de trabajo, tres de ellos en montaña (norte de Laos), y tres en paisajes más suaves (oeste de Francia). Las técnicas empleadas en la interpolación incluyen: Ponderación Inversa a la distancia, Kriging ordinario, Kriging universal, Función de Base Radial Multicuadrática y Spline. Las técnicas de interpolación se emplean variando también la densidad de puntos, en el caso de Laos se generó un conjunto de puntos a partir de curvas de nivel digitalizadas, obteniéndose 8.850 puntos en total, que corresponde a una densidad de 400 puntos/Km² (equivale a una malla de 50×50 m), también se emplearon densidades equivalentes mallas de 100×100 m y 500×500 m. En la zona de Francia se realizó un procedimiento similar obteniendo idénticas densidades. En cada conjunto de datos se seleccionaron de manera aleatoria de 25 a 100 puntos para la validación. La evaluación de los MDE se llevó a cabo comparando las altitudes de los pdc seleccionados para cada zona, calculando la media de las diferencias (μ) y RMSE. Se obtienen una cantidad ingente de resultados, pero como conclusión se indica que, sin considerar el área y la morfología del paisaje, las técnicas de interpolación empleadas tienen pocas diferencias entre unas y otras, si la densidad de puntos es alta. A bajas densidades de puntos el resultado es más cambiante. El Kriging presenta una mejor estimación en zonas de áreas grandes, en áreas muy pequeñas (en las que la variabilidad del terreno es poca), el método de Ponderación Inversa a la Distancia obtiene mejor resultado. El método de Función de Base Radial Multicuadrática tiene mejor rendimiento en las zonas montañosas de Laos, independientemente de la escala de trabajo. Plantea la utilidad de este estudio para los especialistas de SIG, y la necesidad de evaluar la calidad del MDE por parámetros derivados de primer y segundo orden, como la pendiente, curvatura, así como por la determinación de redes de drenaje y límites de cuencas, ya que algunas aplicaciones SIG dependen de ellos. Esos elementos son muy sensibles a las técnicas de interpolación.

76. KYRIAKIDIS, P.C.; GOODCHILD, M.F. (2006). *On the prediction error variance of three common spatial interpolation schemes.* International Journal of Geographical Information Science. Vol. 20, nº 8, pp. 823-855 // Estudio teórico bastante profuso y detallado sobre las incertidumbres generadas por la interpolación lineal, en un segmento, en un triángulo, o en un cuadrado (interpolación bilineal). Estudia la propagación de incertidumbres en puntos intermedios o interpolados linealmente a partir de puntos conocidos, de los que se conoce también las varianzas de las incertidumbres de medida, así como las covarianzas. Se deriva la predicción de varianzas de incertidumbre asociadas a los valores interpolados en puntos genéricos, en cualquier localización sobre los objetos definidos en el MDE (triángulos, cuadrados, etc.). Los métodos de interpolación se enmarcan dentro de la geoestadística, y se demuestra que podrían considerarse como casos particulares de Kriging Universal. El método Kriging, no obstante, no da una evaluación realista cuando el dato representado no se adapta a la variación lineal entre puntos de valores conocidos.
77. DANIEL, C.; TENNANT, K. (2007). *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual.* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Capítulo 12 // Es el capítulo dedicado a la calidad de MDE en una de las principales referencias sobre la materia. Se plantean varias preguntas que se

deberían considerar: ¿Cuál es la aplicación en la que necesito un MDE?, ¿Qué tipo de MDE se ajusta mejor a las necesidades de la aplicación? y ¿Cómo sé que he seleccionado el MDE adecuado? Establece dos categorías de parámetros de adecuación de un MDE a la aplicación propuesta: por un lado, requisitos sobre los datos (incertidumbre vertical, incertidumbre horizontal y paso de malla); y por otro lado, la usabilidad (Datum vertical, Datum horizontal, Proyección cartográfica, formato, tamaño, metadatos, etc.). Para el cálculo de la incertidumbre vertical aplica el estándar NSSDA. Deja bien claro que el control de calidad del MDE debe estar orientado tanto al proceso de adquisición como de producción. Detalla de una forma minuciosa los errores que intervienen en la adquisición (errores de la propia fuente, posibles errores sistemáticos, etc.) de MDE mediante Fotogrametría, LiDAR, InSAR. El proceso descrito sigue el usado por FEMA (ver referencia 44). Establece un mínimo de 20 pdc por tipo de cubierta del terreno. Los autores proponen el siguiente proceso: 1) determinar los percentiles de error; 2) calcular el RMSE usando todos los pdc como si la distribución de los errores fuera normal, si ningún error sobrepasa el 3σ quiere decir que no hay atípicos por lo que la exactitud se puede valorar en $1.96 \times \text{RMSE}$; 3) determinar si el percentil del 95% de los errores puede usarse para estimar la incertidumbre al 95% del nivel de confianza, si una vez calculado el valor 3σ siguen existiendo atípicos en el 95% de los datos se pasa al paso 4, en caso contrario ya se tendría el valor de la incertidumbre final; 4) usar el percentil 90% y proceder de la misma forma que en el paso anterior y si existen atípicos se pasa al paso 5; 5) tomar una decisión, es el usuario quien debe establecer el umbral a partir del cual acepta el cálculo de incertidumbre, o bien, realiza un análisis más exhaustivo para la eliminación de sistematismos y atípicos. Cuando los atípicos superan el 10% se debe, en la mayoría de las ocasiones, al tipo de cubierta (zonas de mucha vegetación o edificaciones).

78. DELGADO GARCÍA, J.; SOARES, A.; PÉREZ GARCÍA, J.L.; CARVALHO, J. (2007). *Aplicación del método de simulación secuencial directa para la evaluación de la incertidumbre local en Modelos Digitales de Elevaciones*. Geofocus International Review of Geographical Information Science and Technology. N° 7, pp. 23-37 // Se evalúa la calidad de MDE utilizando puntos que no han participado en la formación del modelo. Se segrega un subconjunto de puntos pertenecientes al conjunto de puntos original, y por tanto, con la misma incertidumbre de medida que con los que se obtiene el MDE. Se parte de datos LiDAR, obtenidos en un área de unas 32 Ha en la ciudad de Granada, con un total de 1.592.487 puntos, y se seleccionan 50.000 de forma aleatoria que son los que posteriormente se utilizarán en el control de calidad. Se aplica una metodología geoestadística basada en la simulación secuencial directa para la caracterización de la incertidumbre a nivel local propia de los cálculos al uso, realizados a nivel global. Se generan 10 modelos simulados y, la calidad se comprueba utilizando 500 valores adicionales que no se han introducido en el proceso de simulación. El $\text{RMSE} = 10$ m entre los valores medidos y simulados. La metodología de simulación empleada presenta una ventaja muy importante al no requerir ningún tipo de transformación previa de los datos, a diferencia de otros métodos de simulación (p.ej. simulación secuencial de indicatrices o la secuencial gaussiana). Gracias a esta ventaja es posible realizar simulaciones en MDE que presentan histogramas marcadamente sesgados o en el caso de variables no estacionarias (zonas de ladera).

79. RACOVITEANU, A.E.; MANLEY, W.F.; ARNAUD, Y.; WILLIAMS, M.W. (2007). *Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes*. Global and Planetary Change, vol. 59, pp. 110-125 // Evalúa la adaptabilidad de los datos de altitud procedentes de ASTER y SRTM para estudios glaciológicos. El área de estudio se sitúa en Nevado Coropuna (una altitud media de 6.426 m), Ampato (Perú). El área del glaciar ha pasado de 82,6 km² en el año 1.962 a 60,8 km² en el año 2.000. Se parte de dos mapas topográficos a E50k elaborados a partir de Fotogrametría en el año 1.955, para elaborar un MDE de 30×30 m de malla que se toma como referencia. Se comparan los MDE de ASTER, SRTM y el de los mapas topográficos, validándolos con respecto a 64 pdc medidos por GPS, en zonas de roca y por tanto totalmente despejadas. El RMSE=23 m para SRTM. El RMSE=61 m para ASTER. Para el MDE derivado de los mapas topográficos fue RMSE = 14,7 m (interpolación TOPOGRID), y RMSE= 24,2 m (Ponderación Inversa a la distancia), siendo ambos los valores máximo y mínimo para los diferentes métodos de interpolación empleados. Entre el MDE de SRTM y el MDE de referencia para el año 1.955 se obtiene una diferencia de $\mu=-1,8$ m y $\sigma=15,7$ m. La diferencia entre el MDE ASTER y el MDE posee $\mu=80,5$ y $\sigma=28,1$ m. Se concluye que los análisis multitemporales con MDE para cuantificar los cambios de glaciares son muy sensibles a la calidad y resolución espacial de los MDE.
80. FARAH, A.; TALAAT, A.; FARRAG, F.A. (2008). *Accuracy assessment of Digital Elevation Models using GPS*. Artificial Satellites, Vol. 43, n° 4 // Se repasan las técnicas de captura de datos para la formación de MDE. Se centra en la técnica GPS, aludiendo a su menor coste y rapidez, al mismo tiempo que es una tecnología que facilita MDE con un alto nivel de exactitud, lo que se considera bastante favorable para países en desarrollo. En una zona rural de 100×100 m realiza una toma de datos GPS en postproceso, tanto en *Stop&Go* como Cinemático. Se realiza una comprobación de estos dos MDE con otro MDE obtenido por Topografía clásica (Estación Total) de la misma zona. Todos los MDE son obtenidos a partir de una interpolación por Kriging y con una malla de de 10×10 m. Finalmente se llega a la conclusión de que la metodología GPS con postprocesado *Stop&Go* sigue un comportamiento próximo al de las medidas topográficas, con un $\mu = 11,6$ cm y $\sigma = 1,06$ cm en las diferencias entre MDE. Para los autores el método *Stop&Go* da mejores resultados que el método Cinemático.
81. OZAH, A.P.; KUFONIYI, O. (2008). *Accuracy assessment of contour interpolation from 1/50.000 topographical maps and SRTM data for 1/25.000 topographical mapping*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol XXXVII. Part B7, pp. 1347-1353, Beijing 2008 // El objetivo es analizar diferentes métodos de interpolación para obtener curvas de nivel para cartografía topográfica a E25k (no detalla el método o los métodos de interpolación empleados). Se parte de un MDE procedente de SRTM, las altitudes del mapa topográfico a E50k y datos GPS de campo de una zona del suroeste de Nigeria, cubriendo el área de 27,8×27,5 Km, con un rango de altitudes entre 182 y 594 m. Se realiza una comparación entre los MDE SRTM y GPS obteniendo una incertidumbre de $\sigma = 7,74$ m y un coeficiente de correlación $R=0,993$. Así mismo se realiza una comparación de los datos del mapa topográfico E50k y los datos GPS obteniendo una $\sigma = 3,92$ m con un coeficiente $R=0,998$. Los coeficientes de correlación dan una idea de la proximidad entre la superficie SRTM y del mapa E50k con respecto al

- considerado terreno real (datos GPS). Se concluye que ambas fuentes se pueden considerar adecuadas para producir cartografía a E25k, no obstante, en el caso de los datos SRTM se plantea un filtrado previo, ya que presentan algunos valores atípicos.
82. STOLZ, A.; HUGGEL, C. (2008). *Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results*. Landslides, Vol. 5, pp. 311-319 // El objetivo es estudiar el comportamiento de dos modelos de flujo de sedimentos en un Parque Nacional suizo, con una extensión de 170 Km². Se emplean tres MDE diferentes, el primer MDE con una malla de 25×25 m, con una incertidumbre vertical de en torno a RMSE=3 m, este MDE se ha obtenido por remuestreo a partir de uno de malla de 20×20 m; el segundo MDE de 4×4 m de malla, obtenido a partir de diferentes fuentes, principalmente fotogrametría, con un intervalo de incertidumbre vertical de RMSE=0,1 a RMSE=3 m; y un tercer MDE de 1×1 m de malla, obtenido por LiDAR y con una incertidumbre vertical de RMSE=0,1 m. Para zonas de gran peligro potencial de flujo de sedimentos, el MDE de 25×25 m da resultados buenos y robustos, mientras que el MDE de alta resolución puede dar una información más detallada, y hacer que los parámetros del modelado se ajusten más a la realidad, no obstante, todo depende del modelo de flujo empleado. Se trabaja con dos modelos de flujo, uno más sensible y complejo (FLO-2D), y otro menos sensible (MSF). Según los autores se podía haber trabajado con un mismo MDE variando su resolución y observando los efectos en cada uno de los modelos de flujo, pero esto no lo lleva a cabo y lo deja para estudios posteriores.
83. AGUILAR, F.J.; MILLS, J.P. (2008). *Accuracy assessment of LiDAR-Derived digital elevation models*. The Photogrammetric Record, Vol. 23, n° 122, pp. 148-169 // Subraya la carencia de un índice de calidad para MDE (p.ej. los MDE obtenidos por LiDAR normalmente no suelen venir acompañados por un estimador de su calidad). Se centra en el estudio de MDE obtenidos por LiDAR para los que la ASPRS (2004, ver referencia 58) y el NSSDA (FGDC) establecen una forma de evaluar la incertidumbre vertical cuando los errores no se distribuyen según una distribución normal. En este artículo se propone una metodología teórica para evaluar la incertidumbre vertical de datos LiDAR. El método se basa en la estimación por medio de la construcción de intervalos de confianza a partir de muestras finitas de diferencias de altitud obtenidas en pdc uniformemente distribuidos. Se usaron datos del proyecto EuroSDR en zonas de Stuttgart (Alemania) y datos de la zona costera de Scarborough en North Yorkshire (Inglaterra), ésta última zona con suelo prácticamente despejado o desnudo. En el primer caso, los datos de referencia para el cálculo de las diferencias de altitud entre MDE y realidad, se obtenían segregando grupos de datos a partir de los datos LiDAR originales; en el segundo caso, se obtuvieron a partir de datos GPS observados en cinemático, pero con una incertidumbre baja (1 a 2 cm). Se hicieron pruebas con cada modelo teórico de evaluación de la incertidumbre y con un número diferente de puntos de control, desde 20 a 200 puntos. Se analizaron el comportamiento del estimador de incertidumbre en función del número de pdc y el porcentaje de incertidumbre dentro del intervalo de confianza en función del número de pdc. La metodología propuesta trabaja bastante bien en cualquier condición (despejado y no despejado, con vegetación, edificios, etc.) debido a que los parámetros de entrada, con la existencia de sesgo y curtosis, permiten al modelo buscar la naturaleza estadística del conjunto de datos. Además, se calculan intervalos de confianza estrechos y fiables

cuando se trabaja a partir de pocos pdc (60 puntos). Esto es debido a que la longitud del intervalo depende básicamente en la desviación estándar de la muestra, sesgo y curtosis, más que el número de pdc usados. La metodología propuesta no sólo permite estimar intervalos de confianza, también calcula el estimador (RMSE) de la incertidumbre de los datos. Dependiendo de la curtosis de la población de error, entre 60 y 160 pdc podrían ser necesarios. Sin embargo, en terreno despejado el RMSE podría evaluar la incertidumbre de forma más satisfactoria por medio de la t de Student, ya que necesita menos pdc que el modelo propuesto (20 a 40 pdc). Finalmente, teniendo en cuenta la variabilidad de los datos testeados, los resultados muestran que los modelos propuestos reproducen el comportamiento estadístico de las desviaciones verticales de los datos LiDAR usando un número bajo de pdc, incluso en el caso de distribución no normal.

84. ARIZA LÓPEZ, F.J.; ATKINSON GORDO, A.D. (2008). *Analysis of Some Positional Accuracy Assessment Methodologies*. Journal of Surveying Engineering vol. 134 (2), pp. 404-407 // Se presenta el análisis de algunos métodos estándar para la evaluación de la incertidumbre posicional de datos espaciales, para ello se tienen en cuenta algunos aspectos: formulación estadística, el tamaño de la muestra de control, la distribución y tipología de los elementos de control, etc. Los estándares analizados son: NMAS (USBB, 1947, ver referencia 1), EMAS (ASCE, 1983, ver referencia 2), ASLSM (ASPRS, 1990, ver referencia 3), MIL-STD-600001 (DoD, ver referencia 4), NSSDA (FGDC, 1998, ver referencia 35), STANAG 2215 (STANAG, 2003, ver referencia 54). El estudio revela grandes diferencias entre los estándares considerados, pero también grandes similitudes (en aspectos como el tamaño de muestra recomendado, tratamiento de los atípicos, cumplimiento del modelo base estadístico, etc.). También concluye que la mayoría de los estándares no se presenta de una manera formal y no incluyen una terminología estándar para referirse a la incertidumbre. Los procesos estadísticos difieren mucho en sus métodos de estimación y hay disparidad en el tamaño mínimo de muestra de control recomendada. No se indica nada en cuanto a los atípicos. Los puntos bien definidos son los únicos elementos considerados en el control de calidad, teniendo en cuenta que los MDE tienen una naturaleza diferente, otros elementos o forma de controlar la calidad se podría contemplar. No incorporan una perspectiva de incertidumbre relativa, apenas se considera la representación gráfica para la expresión de los resultados del control. Ausencia de manuales o documentos explicativos. Finalmente concluye que las instituciones cartográficas y normativas deberían aunar esfuerzos en el desarrollo de unos estándares específicos de evaluación de la incertidumbre posicional.
85. DARNELL, A.R.; TATE, N.J.; BRUNSDON C. (2008). *Improving user assessment of error implications in digital elevation models*. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 32, pp 268-277 // Según los autores el extenso, complejo y variado conjunto de métodos propuestos para evaluar la incertidumbre en MDE produce confusión en el usuario de estos datos. En este estudio se combinan métodos existentes simplificados para ofrecer un prototipo de herramienta que permita a cualquier usuario de MDE acceder y aplicar el análisis de incertidumbres. También se trata la propagación de la incertidumbre en parámetros derivados del MDE, como la pendiente. La mayoría de las ocasiones se informa de la incertidumbre del MDE mediante un estadístico como el RMSE, que da una idea de calidad global en toda la extensión del modelo, suponiendo un comportamiento uniforme del estadístico. Sin

embargo, existen evidencias que muestran que la incertidumbre de un MDE es espacialmente variable y autocorrelada, y depende, en muchos casos, de la pendiente o morfología del propio terreno. La zona de ensayo está situada al noroeste de Eslovenia y cubre una superficie total de 25 Km². El MDE LiDAR con el que se trabaja posee un RMSE= 15 cm en altitud. El método se desarrolla en cuatro pasos: 1) cuantificación de la incertidumbre del modelo frente a datos de mayor exactitud (medidas GPS) y modelado de la dependencia espacial de la incertidumbre; 2) simulación condicional estocástica (el variograma determinado en el paso anterior se usa en una simulación gaussiana secuencial para generar N mapas de incertidumbre, generan N MDE de igual probabilidad), y propagación a superficies derivadas (pendiente, susceptibilidad a deslizamiento de laderas). Gran parte del trabajo fue desarrollado mediante scripts de R y funciones de GSTAT. Al aplicarlo en la zona de estudio, se hallaron incertidumbres medias muy altas debido a la existencia de un sistematismo, provocado por un problema con el origen de altitudes. La distribución de las incertidumbres en los modelos considerados es muy parecida. Para demostrar la propagación de la incertidumbre en el parámetro de pendiente, los valores de pendiente derivados del MDE se compararon con los valores medios de las realizaciones perturbadas, la mayor discrepancia se dio en los lugares de mayor incertidumbre en altitud.

86. COZ, M.L.; DELCLAUX, F.; GENTHON, P.; FAVREAU, G. (2009). *Assessment of Digital Elevation Model (DEM) aggregation methods for hydrological modeling: Lake Chad basin, Africa*. Computers & Geosciences, vol. 35, pp. 1661-1670 // Se evalúa el impacto que tiene sobre un MDE el remuestreo de un paso de malla de 3×3" (aprox. 90 m) a 5×5' (aprox. 10 km) con el fin de poder gestionar a una menor escala un territorio mucho más amplio. Se emplean MDE procedentes de SRTM, la zona de estudio está situada en el Lago Chad. En el artículo se proponen seis algoritmos para agregar MDE, esos son: media, mediana, moda, vecino más cercano, máximo y mínimo. El proceso que desarrolla cada algoritmo consiste en calcular el parámetro correspondiente dentro de una ventana de 5×5' a partir del modelo de 3×3" de paso de malla. La media y la mediana producen buenos resultados para un estudio de conectividad de la red de drenaje (siendo ésta calculada en el módulo *watershed analysis* de GRASS, que usa el algoritmo D8), para el estudio de topografía en las llanuras de inundación el vecino más cercano y máximo son los más adecuados.
87. HU, P.; LIU, X.; HU, H. (2009). *Accuracy Assessment of Digital Elevation Models based on Approximation Theory*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 75, nº 1, pp. 49-56 // Se parte de la hipótesis de la incapacidad de la teoría de propagación de incertidumbres para tener en cuenta las características espaciales y estructurales de las mismas en MDE, lo que sugiere la necesidad de una evaluación alternativa de la incertidumbre de MDE. Para ello se introduce la Teoría de la Aproximación, que estudia cómo aproximar una función compleja usando funciones más simples. En el contexto de la generación de un MDE, el terreno es una función compleja y el MDE es la función de aproximación, construida a trozos interpolados. Se establece que la incertidumbre tiene dos componentes: la procedente de la propagación desde los datos fuente, etc.; y la de interpolación. Ambas componentes dependen de la función de interpolación con lo que no pueden ser independientes. Por otro lado, la incertidumbre de interpolación es un error sistemático, mientras que el de

- propagación es aleatorio. En la parte experimental se comparan tres métodos de interpolación (interpolación lineal en una dimensión, interpolación TIN e interpolación bilineal en un rectángulo), obteniendo el mejor resultado con el método de interpolación lineal en una dimensión, paradójicamente el más empleado en la actualidad es el de interpolación TIN (no refleja el resultado cuantitativo de esos datos).
88. OLIVEIRA, C.G. DE; PARADELLA, W.R. (2009). *Evaluating the quality of the Digital Elevation Models produced from ASTER stereoscopy for topographic mapping in the Brazilian Amazon Region*. Anais da Academia Brasileira de Ciências. Vol. 81, pp. 217-225 // Según los autores, el problema de la representación y descripción detallada de determinadas zonas remotas del planeta, de difícil acceso, ha tenido solución con la aparición de plataformas y sensores como ASTER. En este trabajo se presenta el caso de una zona limítrofe de la Amazonía Brasileña, en la que se ha realizado la comparación del MDE obtenido a partir de estereomágenes ASTER frente a pdc obtenidos por GPS. El artículo focaliza la atención en el número óptimo de puntos de apoyo en terreno necesarios para la obtención de un MDE que satisfaga las condiciones de exactitud equivalentes a una cartografía topográfica a E100k. Concluye que para obtener una incertidumbre de 10 m en altitud es suficiente disponer de un mínimo de 17 puntos de apoyo en terreno.
89. McNEILL, S.J.; BELLISS, S.E. (2009). *Assessment of Digital Elevation Model Accuracy using ALOS-PRISM Stereo Imagery*. 24th International Conference Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ 2009 // El objetivo es identificar las características del sensor ALOS-PRISM que limitan la generación de MDE, e identificar estrategias para mejorar la exactitud en la generación de MDE, usando métodos automatizados siempre que sea posible. Se trabaja en dos zonas: Manawatu y Christchurch, en Nueva Zelanda, con extensiones de 32×39 Km aprox. Se mejoran los parámetros de las estereomágenes que influyen en la obtención de MDE (calidad de imágenes, exactitud de los puntos de apoyo, la compresión JPEG -que era muy severa anteriormente a 2007 se ha suprimido hasta cierto punto por postprocesado-). Para evaluar la exactitud del MDE, en la zona de Manawatu, se calculan las discrepancias en altitud contrastando con dos fuentes de mayor exactitud: 1) un MDE de cobertura nacional y paso de malla de 20×20 m, del que se extraen 364 puntos de control y, 2) los vértices geodésicos del Servicio Geodésico Nacional. En la zona de Christchurch la evaluación de la exactitud se realizó frente a medidas GPS (105 puntos). En la zona de Manawatu, tanto con una fuente como con la otra fuente de datos de mayor exactitud, se observó un error sistemático en las diferencias, este ligero error sistemático también se observó en la zona de Christchurch. El resultado da una $\mu=4,64$ m y una $\sigma=6,48$ m. Concluye que la calidad de los puntos de apoyo terreno empleados en la obtención del MDE a partir de las estereomágenes, es un elemento fundamental para mejorar estos resultados.
90. HÖHLE, J.; HÖHLE, M. (2009). *Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 64, pp. 398-406 // Se centra en la evaluación de la calidad de MDE obtenidos por ALS y Fotogrametría digital. Se presentan errores sistemáticos y atípicos en ambas tecnologías de captura de datos. Se establecen los requisitos de los datos de referencia para la evaluación de la calidad. También se propone el uso de métodos estadísticos robustos como medidas de incertidumbre. Los pdc son puntos que deben

tener al menos tres veces más exactitud que el MDE evaluado, para la determinación de la altitud del pdc en el MDE, debe realizarse una interpolación que, habitualmente, es una interpolación bilineal. Una de las medidas robustas de incertidumbre es la mediana (percentil del 50%), ya que es menos sensible a los atípicos y ofrece un mejor resumen de distribución en el caso de la existencia de sesgo (error sistemático). También se emplea una muestra de los cuantiles de la distribución de las diferencias de altitud en valor absoluto. El problema de la existencia de muchos atípicos puede solventarse facilitando la NMAD (*Normalized Median Absolute Deviation*) cuya expresión es $NMAD = 1,486 \times \text{median}_j(|\Delta h_j - m_{\Delta h}|)$, donde $m_{\Delta h}$ es la mediana de las diferencias de altitud, de esta forma el NMAD es proporcional a la mediana de las diferencias en valor absoluto entre las diferencias de altitud y la mediana de esas diferencias, este valor sería equivalente a la desviación típica en una distribución normal. Según los autores, a todos los estimadores debería acompañarles un intervalo de incertidumbre, p.e. al 95%. Se presentan varios ejemplos de MDE con atípicos, y pdc tomados por GPS. La zona de trabajo está situada en ciudades y distintos paisajes seleccionados en Dinamarca. En el contraste de un MDE fotogramétrico con pdc se obtiene un RMSE= 20 cm, mientras que $\sigma = 15$ cm, por lo que se evidencia la existencia de atípicos, el valor de NMAD y el cuantil 68.3% tienen el mismo valor. Se advierte que el percentil del 95% es mayor que dos veces el percentil del 68%, lo cual claramente indica la no normalidad de la distribución. En el caso del MDE obtenido por láser escáner aerotransportado, se detecta la presencia de un atípico que, una vez eliminado, reduce significativamente el valor de la incertidumbre estimada hasta $\sigma = 7$ cm; el valor del NMAD y del percentil 68.3% son muy similares (6 y 7 cm, respectivamente). El valor de σ es 2,1 veces mejor que el obtenido en el MDE fotogramétrico.

91. BATER, C.W.; COOPS, N.C. (2009). *Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation*. Computers & Geosciences. Vol. 35, pp. 289-300 // Este estudio evalúa el error de MDE obtenidos a partir de observación LiDAR (con una densidad media de 0.12 ptos/m²), con el fin de analizar el comportamiento del error según el método de interpolación, la orografía del terreno y la cubierta vegetal del mismo. La zona de estudio tiene una extensión de 4×7 km en Vancouver Island, British Columbia. Se han interpolado MDE con paso de malla de 0,5×0,5 m, 1×1 m y 1,5×1,5 m. Las rutinas de interpolación empleadas han sido: interpolación lineal, interpolación polinomial de grado 5, vecino natural, spline regularizado, spline de tensión, método de diferencias finitas e interpolación mediante ponderación de inversa a la distancia. El terreno se clasificó en función de su pendiente, densidad de retorno del pulso LiDAR, tipo de cubierta vegetal, e Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN), derivados de imágenes Quickbird y Landsat 7 ETM+. El RMSE y el valor absoluto medio de los residuos entre las superficies y los puntos de control (a partir de los datos LiDAR se separó un 3% de los puntos que harían la función de pdc) indican que el MDE de 0,5 m paso de malla es el más exacto. De los algoritmos de interpolación, el método de Spline regularizado y ponderación de la inversa de la distancia son los que arrojan las incertidumbres más altas, con valores de RMSE=6 m en zonas de fuerte pendiente. El algoritmo de vecino natural es el que ofrece mejores resultados. Los valores de RMSE se mueven en un rango de 0,17 a 0,25 m, decreciendo para todas las rutinas de interpolación conforme disminuye el tamaño del paso de malla

del MDE. La cubierta vegetal de bosque joven fue la que dio incertidumbres más altas, $RMSE = 0,18$ a $0,23$ m. En las zonas de menor densidad de puntos LiDAR se obtiene una incertidumbre media absoluta de $RMSE = 0,20$ m. El trabajo finaliza exponiendo que con un conocimiento más exhaustivo del comportamiento de la incertidumbre del MDE, en función del tipo de cubierta vegetal y la orografía del terreno y de la densidad de la señal LiDAR, se puede proponer un método para crear mapas de predicción de incertidumbres usando análisis de árboles de clasificación y regresión.

92. HERITAGE, G.L.; MILAN, D.J.; LARGE, A.R.G.; FULLER, I.C. (2009). *Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality*. *Geomorphology*, Vol. 112, pp. 334-344 // Se evalúa la calidad de los MDE en función del método de interpolación, de la estrategia de muestreo (considera la estrategia de muestreo en función de la densidad de puntos empleados y su distribución en la zona) y calidad de los puntos empleados en la formación del MDE. La zona de estudio se ubica en la ribera del río Nent, Cumbria (Reino Unido). Se compararon 5 estrategias de muestreo: secciones transversales, sólo contorno de la zona (zona de arena en la ribera del río), perfil de la zona de grava y canal, perfil de zona de grava y canal con puntos acotados y datos equivalentes a simular un LiDAR aéreo, derivados de un escaneo con láser escáner terrestre (además se le incluyeron, a esta estrategia de muestreo, errores aleatorios de $\pm 0,15$ m a cada punto, simulando de esta manera los errores en altitud de los puntos de un vuelo LiDAR). Los MDE se formaron utilizando cinco algoritmos de interpolación, empleando el software SurferTM GIS: inversa de la distancia al cuadrado, Kriging usando el variograma por defecto, Kriging usando un variograma producido a partir de los datos, algoritmo de mínima curvatura y triangulación de Delaunay con interpolación lineal. Los MDE resultantes de cada uno de los algoritmos de interpolación y estrategias de muestreo se diferenciaba con respecto al MDE obtenido por los datos de láser escáner terrestre (con una incertidumbre posicional absoluta de los puntos de $0,05$ m y en el que se empleó el método de interpolación de Triangulación de Delaunay, como interpolador más exacto) con el fin de obtener la distribución espacial de la incertidumbre vertical y volumétrica. En general, la estrategia de muestreo de simulación de LiDAR es la que da valores más bajos de desviación estándar de las incertidumbres. Los métodos de interpolación que arrojan menores valores de desviación estándar de la incertidumbre, son los dos métodos de Kriging ($\sigma = 0,184$ m) seguidos por la Triangulación con interpolación lineal ($\sigma = 0,188$ m). En todas las estrategias de muestreo el método de interpolación que peores resultados da es el de Mínima Curvatura. La distribución espacial de los puntos y la incertidumbre de la interpolación se relacionaron también con la morfología del terreno, para ello se estableció una ventana móvil sobre la zona con un radio de $0,1$ m, calculándose la desviación estándar de las diferencias de altitud de todos los puntos respecto a la altitud promedio dentro de la ventana (en la nube de puntos proveniente del láser escáner terrestre), determinando de esta forma la rugosidad de la morfología del terreno en cada ventana, posteriormente relaciona esta variable con la diferencia en altitudes, para cada estrategia de muestreo y método de interpolación. Se observa que al aumentar la rugosidad del terreno aumenta la incertidumbre del MDE, por tanto, se deduce que existe incapacidad de los algoritmos de interpolación de modelar con exactitud al incrementarse la complejidad morfológica del terreno, debido a la falta de datos locales. Sin embargo, las zonas de alta complejidad morfológica se modelan mejor mediante estrategias de muestreo basadas en aspectos morfológicos, siendo esto uno

de los grandes hallazgos de este estudio. Se concluye diciendo: 1) que la incertidumbre del MDE está fuertemente influido por la posición de los puntos muestreados para su formación, 2) que la elección del algoritmo de interpolación no influye, siendo de los aspectos menos importantes, 3) que las incertidumbres no se comportan de forma uniforme espacialmente, y por tanto son función de la morfología local del terreno, y finalmente, 4) se han generado una serie de ecuaciones que relacionan la estrategia de muestreo, el algoritmo de interpolación y la morfología local para cuantificar una estimación de la incertidumbre del MDE.

93. STANAG 2215. (2010) *Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data*. Agencia de Normalización de la OTAN. // STANAG 2215 propone un método para la evaluación de la incertidumbre posicional. Se trata de un método de control posicional basado en datos puntuales. La finalidad es proporcionar a los organismos productores de cartografía un procedimiento normalizado para evaluar los productos cartográficos destinados a ser utilizados por las fuerzas armadas de la OTAN. Para la evaluación de la calidad establece cinco aspectos a estudiar de forma independiente: a) Incertidumbre geométrica absoluta referida al sistema geodésico WGS84, resultado de la combinación de la incertidumbre planimétrica (X e Y), referida al sistema WGS84, y de la incertidumbre altimétrica (Z) referida al modelo de geoide EGM96; b) Incertidumbre horizontal, vendrá dada por el desplazamiento horizontal entre un conjunto de pdc (obtenidos de una fuente de mayor exactitud) y los puntos homólogos en el producto objeto de evaluación (el cálculo de la incertidumbre planimétrica se basa en la teoría del error circular). El criterio aplicado considera que el 90% de los desplazamientos deberán encontrarse dentro de los límites fijados según la escala (para lo que existe una clasificación en función de la escala es éste estándar); c) Incertidumbre vertical. Se determina la diferencia entre la altura de los puntos de control y la altura de los puntos homólogos sobre el producto (el cálculo de la incertidumbre altimétrica viene dada por el cálculo de la desviación estándar lineal). El 90% de las diferencias deberá encontrarse dentro de los límites fijados. d) Estado de actualización, pone de manifiesto algunas deficiencias del producto cartográfico, propone tres códigos de clasificación (M, R y X) en función de si el producto satisface los criterios de actualización o no, o es algo indeterminado; e) Fecha efectiva de la información original, es decir, la fecha en la que se generó la información utilizada en la formación o revisión del producto cartográfico. El estándar recomienda utilizar un mínimo de 167 pdc de forma que el índice obtenido sea representativo de la población con un nivel de confianza del 90%, que los pdc estén repartidos de forma uniforme en la zona de estudio, utilizar elementos geográficos bien definidos, destacando el uso de los vértices geodésicos o puntos de apoyo del vuelo fotogramétrico.
94. ERDOGAN, S. (2010). *Modelling the spatial distribution of DEM error with geographically weighted regression: An experimental study*. Computers & Geosciences Vol. 36, pp. 34-43 // Las medidas de calidad de MDE generalmente se basan en índices o medidas sobre la totalidad del MDE. En este estudio se examinan las magnitudes y su patrón espacial, poniendo de manifiesto la relación que existe entre la incertidumbre del MDE y la densidad de datos fuente, así como con las características morfológicas del terreno (correlación). Para modelar la relación entre la incertidumbre y las características del relieve se usaron dos métodos: 1) el método de regresión por mínimos cuadrados ordinarios; y 2) el método de regresión ponderada

geográficamente. Este último, es un método de regresión local novedoso que ofrece mejores resultados y pone de manifiesto la carencia de densidad de datos fuente en determinadas zonas, según la morfología del terreno. Se emplearon métodos de interpolación basados en técnicas determinísticas (estas técnicas crean una superficie a partir de los puntos usando fórmulas matemáticas, basadas tanto en la extensión de similitud como en el grado de suavizado), la Interpolación de Base Radial es el nombre que reciben una gran familia de interpoladores determinísticos que se basan en que la función de interpolación debería pasar lo más cerca posible de los datos puntuales de partida, con diferentes densidades de datos (2500, 625, 100 y 25 pts/Ha). La cantidad y distribución de las incertidumbres se calcularon utilizando técnicas de validación cruzada. Se usaron índices de autocorrelación espacial global y local para cuantificar el patrón de la incertidumbre global. Finalmente se usaron modelos de regresión para comprobar la relación entre la incertidumbre del MDE y las características del terreno. Los índices de autocorrelación muestran un fuerte agrupamiento de las incertidumbres con datos fuentes muy densos. Concluye indicando la importancia de la relación entre la incertidumbre y los parámetros de la superficie del terreno, ya que sería útil para determinar las localizaciones de mediciones de puntos, en mayor densidad, en función de la complejidad de la superficie.

95. AGUILAR, F.J.; MILLS, J.P.; DELGADO, J.; AGUILAR, M.A.; NEGREIROS, J.G.; PÉREZ, J.L. (2010). *Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 65, pp. 103-110 // Se desarrolla un modelo híbrido, teórico-empírico, para modelar la incertidumbre vertical derivada de datos LiDAR en terrenos poco despejados (presencia de vegetación, edificios, etc.). El objetivo es establecer una relación entre la densidad de muestreo LiDAR, morfología del terreno, método de interpolación e incertidumbre del MDE derivado de los datos LiDAR. El modelo desarrollado es la suma de tres componentes de incertidumbre generales: 1) la incertidumbre de los datos fuente, a partir de los que se obtiene el MDE, en este caso la incertidumbre de los datos LiDAR; 2) la incertidumbre “gridding” motivado por el relleno de los huecos de puntos que no son capturados mediante LiDAR, se ha empleado un método de interpolación de Ponderación Inversa a la Distancia; 3) y finalmente, la incertidumbre debido al filtrado de los datos LiDAR (huecos que se producen al eliminar todos los datos que no están referidos a la superficie del terreno, sino a la copa de los árboles, azoteas de edificios, etc.). En terrenos desnudos las dos últimas incertidumbres desaparecen, y se tendrá suficiente densidad de puntos y todos referidos a la superficie del terreno. Este método se ha probado en un MDE de la sierra de Gador (Almería) y en la región de Bristol (Reino Unido), incluyendo la pendiente del terreno y la densidad de puntos en la componente empírica, resultando un buen ajuste entre los datos predichos y los observados, obteniendo un valor de correlación entre ambos valores de $R^2= 0,9856$. En zonas abruptas es donde mejor se comporta el modelo.
96. BEI, J.; XUE-JUN, L.; JIA-PEI, H.; YANG, Y. (2010). *Quantitative Analysis of Error in Extracting Slope Length from Grid-based Digital Elevation Model*. International Conference on Multimedia Technology (ICMT). IEEE. Ningbo, China // Se estudia cuantitativamente la distribución espacial de la incertidumbre en la determinación de la longitud de laderas de pendiente constante extraída de un MDE ráster, con una aplicación directa en el trabajo de áreas de captación, en delimitación de cuencas

hidrográficas, etc. Se seleccionan diferentes superficies matemáticas (p.ej. esfera invertida para las zonas de valle, cúpula elíptica y esférica para área de captación, superficie de silla para divisorias, planos para laderas o pendientes uniformes), deduciendo analíticamente la pendiente así como por cálculo para cada superficie; luego se extraen la pendiente de esas superficies en ArcGIS. Una vez generado el MDE, y se comparan las longitudes de pendiente calculadas a partir de las fórmulas y las obtenidas empíricamente por ArcGIS en el MDE. La incertidumbre viene dada por la diferencia entre el valor del MDE menos el calculado en las superficies matemáticas. Se obtienen valores de $\mu = -0,36$ y $RMSE = 8,34$ m para la superficie de cúpula elíptica hasta valores de $\mu = 132,96$ y $RMSE = 162,94$ m para superficie en silla, siendo estos los valores máximos y mínimos obtenidos. En general las incertidumbres en el área de captación son mayores que en las áreas de valle, otra de las conclusiones es que la incertidumbre en las laderas es muy sensible a la dirección de las mismas, siendo las de dirección de 45° las que menos incertidumbres presentan.

97. CARABAJAL, C.C.; HARDING, D.J.; SUCHDEO, V.P. (2010). *Icesat LiDAR and Global Digital Elevation Models: Applications to DESDYNI*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS. IEEE. Honolulu, Hawaii U.S.A. // Se pone de manifiesto el potencial de los datos adquiridos por el ICESat cuyo instrumento principal es un sensor LiDAR. La incertidumbre de los datos del ICESat está en un nivel subdecimétrico en altimetría, por lo que se plantea utilizar los perfiles obtenidos por él para la evaluación de calidad de MDE. La misión *Deformation, Ecosystem Structure and Dynamics of Ice (DESDynI)* proveerá de datos de perfiles del altímetro láser globalmente distribuidos y muy adecuados para el propósito de control de calidad de MDE, ya que esta misión mejora la huella de barrido del láser pasando de 50 m a 25 m. Se realiza una evaluación de calidad del SRTM de 90×90 m de paso de malla, utilizando los perfiles de ICESat. Se utilizan 4 puntos de control obtenidos de perfiles del ICESat para controlar la calidad de cada tesela de un $1 \times 1^\circ$ del SRTM. Se realizan observaciones láser durante varios periodos, depurando las respuestas del láser en función de las diferentes cubiertas vegetales, etc. en las que incide. En todos los periodos de observación del ICESat se obtiene una media de diferencias entre altitudes con el SRTM de en torno a -2 m y un RMSE máximo de 5,8 m y mínimo de 4,5 m.
98. ZHAO, G.; XUE, H.; LING, F. (2010) *Assessment of ASTER GDEM Performance by Comparing with SRTM and ICESat/GLAS Data in Central China*. Geoinformatics, 18th International Conference. IEEE. // En este estudio se evalúa calidad del ASTER GDEM en comparación con el SRTM y datos locales a partir del ICESat/GLAS. Se trabaja en una zona de $5 \times 5^\circ$ de China Central. Se compararon los dos MDE, remuestreando los datos SRTM a la resolución de los datos ASTER mediante interpolación bilineal. Se comparan los MDE procedentes de SRTM v2 y SRTM v4. También se realizó una comparación del MDE ASTER con los puntos del ICESat/GLAS, obteniendo unos valores de altitud para el caso MDE ASTER de $\mu = 5$ m más bajo que para el caso MDE SRTM y una $\mu = 15$ m más alta que la del MDE ICESat/GLAS. Una de las conclusiones destacables es que el valor estimado de incertidumbre de 20 m que da el productor del ASTER no se ve reflejado en estas comparaciones, pudiéndose achacar al tipo de relieve, y a la mejor exactitud de los MDE de referencia utilizados.

99. MARTÍNEZ, C.; HANCOCK, G.R.; KALMA, J.D.; WELLS, T.; BOLAND, L. (2010). *An assessment of digital elevation models and their ability to capture geomorphic and hydrologic properties at the catchment scale*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 31, nº 23, pp. 6239-6257 // Se parte de un MDE obtenido por GPS con una incertidumbre de $\mu=50$ mm, y con un paso de malla de 5 m, para una zona en Nueva Gales del Sur con una extensión de 150 Ha. Se ha aplicado el procedimiento de escalado jerárquico para investigar el efecto que tiene la resolución espacial sobre un determinado número de descriptores hidrológicos y geomorfológicos. Se produjeron MDE con un paso de malla de 10×10 m, 15×15 m, 20×20 m y 25×25 m. El MDE de paso de malla de 25 m también fue contrastado con un MDE proveniente de fotogrametría producido por los servicios cartográficos australianos, y conocido como el LPI NSW 25 m DEM. Se realiza una comparación visual (cualitativa) entre los MDE y otra cuantitativa, en éste última se comparan: relación área-pendiente (es la relación entre la cuenca de drenaje de pendiente ascendente a través de un punto frente a la pendiente en ese mismo punto); distribución del área acumulativa (define la proporción de la cuenca que tiene un área de drenaje mayor o igual a un área específica); curva hipsométrica (es una curva no dimensional que define área-altitudes que permite una fácil comparación de cuencas con diferentes propiedades de altitudes y área); propiedades de la red de canales y Strahler (descriptores de la red de canales como la función de anchura, convergencia de red y estadística de Strahler). Los resultados indican que conforme aumenta el tamaño del paso de malla, la media de los gradientes de pendiente decrece y la red de drenaje aparece más simplificada. Algunos descriptores como rango de anchura de los canales, área acumulativa y curva hipsométrica aparecen en gran medida insensibles a los cambios de resolución del MDE. En cuanto a los índices de humedad del suelo se llega a la conclusión que para modelar la distribución de humedad del suelo un MDE de 5×5 m de paso de malla es el más adecuado.
100. GOULDEN, T.; HOPKINSON, C.; JAMIESON, R. (2010). *Sensitivity of topographic slope and modeled watershed soil loss to DEM resolution*. Remote Sensing and Hydrology 2010. Proceedings of a symposium held at Jackson Hole, Wyoming, USA) IAHS nº 352 // Se evalúa la pérdida de suelo debido a la erosión que se produce en las cuencas hidrográficas, analizando la influencia que sobre ello tiene la resolución del MDE utilizado. Uno de los parámetros necesarios para esta modelización es la pendiente derivada del MDE. Se parte de un MDE obtenido por técnicas LiDAR, y se remuestra a 1×1 , 5×5 , 10×10 y 20×20 m. Se observa que al decrecer la resolución del MDE el valor medio de la pendiente decrece, de forma que la pendiente media de un MDE de paso de malla de 1 m es más del doble que la pendiente media del MDE con un paso de malla de 20 m. Sin embargo, al determinar la masa de sedimentos desplazados en el MDE de paso de malla de 20 m es el doble que la masa obtenida con un MDE de paso de malla de 10 m. Este resultado que no parece muy lógico es debido a la mayor longitud de la ladera de pendiente uniforme en el MDE de malla más grande, es decir, en el de 20 m.
101. ARIZA LÓPEZ, F.J.; GARCÍA BALBOA, J.L.; UREÑA CÁMARA, M.A. (2010). *TERRA-ASTER GDEM: Una posibilidad global para los catastros altimétricos*. Catastro: formación, investigación y empresa. Sección de ponencias del I Congreso Internacional sobre Catastro Unificado y Multipropósito. Jaén, junio 2010 // Este trabajo pone de manifiesto la utilidad de la información altimétrica en el Catastro, lo

que se ha venido a denominar como “Catastros 3D” (permite un cálculo más fiable y automatizado de las características de las parcelas, posibilidad de utilizar parámetros físicos derivados de la altimetría para una valoración catastral, etc.). En la actualidad hay abundante información espacial que cubre grandes territorios, sobretodo en Europa, que se puede utilizar conjuntamente con la información catastral para conseguir beneficios de lo que se denomina Catastros Multipropósito. Por ello, un producto como el MDE facilitado por la plataforma ASTER, de carácter global, puede ser interesante a la hora de incorporarlo en una base de datos catastral. Para ello se pretende controlar su calidad comparándolo con otro MDE, en este caso uno facilitado por el Instituto Cartográfico de Andalucía (ICA, actual Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía IECA), producto obtenido por métodos fotogramétricos y considerado para este estudio como de mayor exactitud. Se eligen 58 parcelas catastrales de diverso tamaño de superficie, características topográficas y cubiertas (8 categorías). El procedimiento ha consistido en la extracción de un conjunto de valores (media, mínimo y máximo, etc.) derivados de la información altimétrica de los dos productos considerados para el mismo conjunto de 58 parcelas catastrales. Se ha analizado y visualizado todo mediante un paquete estadístico (SPSS). Se realiza una comparación a nivel de histogramas de frecuencias, en una con intervalos de 100 en 100 m de altitud y en otra de metro en metro. En el primer caso la semejanza es elevada entre los histogramas, sobretodo en altitudes bajas, sin embargo, en altitudes altas no hay un sesgo claro en las diferencias. En el caso del histograma de metro, se observa como la semejanza entre curvas de ambos productos sigue siendo muy grande, pero sí se observa que el MDE de ASTER tiene mayor variabilidad entre sus frecuencias que el del ICA. Analizando, ahora de forma cuantitativa, los valores medios de altitud se observa un pequeño sesgo en favor de mayor altitud siempre en el MDE del ICA. En cuanto a las diferencias de altitud dentro de cada parcela los valores no son iguales pero se mantienen en órdenes de magnitud aproximadamente iguales, sin que se observe en este caso sesgo alguno. Concluye considerando el MDE de ASTER como un producto adecuado en exactitud para su utilización en este tipo de Catastros.

102. CHEN, C.; YUE, T. (2010). *A method of DEM construction and related error analysis*. Computers & Geosciences, vol. 36, pp. 717-725 // Se comparan algunos métodos de interpolación clásicos (ponderación inversa a la distancia, Kriging y spline) con un método de modelado de la superficie basado en el teorema de superficies (SMTS). Establece un error que le llama ETR (Error de la Representación del Terreno), que lo relaciona con el paso de malla del MDE y el método de interpolación. Ambos aspectos son fuentes directas de error en el MDE. Este error ETR es el derivado de la interpolación de la altitud de un punto situado en el centro de una tesela conformada por cuatro puntos de los que se conoce su altitud. La comparación del método novedoso de SMTS con los métodos conocidos de interpolación se realiza con el uso del software ArcGIS 9.1. Se realiza un test real en la Meseta de Dongzhi en la provincia de Gansu, China. A partir de cartografía a E5k, se digitalizaron las curvas de nivel obteniendo a través de ellas una nube de puntos que sirvió para la generación de un MDE con paso de malla de 5×5 m de tamaño. El 70% de la nube de puntos se usó en la generación del MDE, el resto sirvió para la validación de los resultados. Se realizaron MDE con varios pasos de malla (5×5, 10×10, 20×20 y 30×30 m), y se analizó el comportamiento con los diferentes métodos de interpolación. El resultado

es que, con independencia del paso de malla, el método de SMTS es más exacto que los demás interpoladores, por ejemplo, en el MDE de 30 m de paso de malla el método SMTS es 1,47 veces más exacto que la ponderación inversa a la distancia, 1,40 veces más exacto que spline y 1,50 veces más exacto que Kriging.

103. COVENEY, S.; FOTHERINGHAM, A.S.; CHARLTON, M.; McCARTHY, T. (2010). *Dual-scale validation of a medium-resolution coastal DEM with terrestrial LiDAR DSM and GPS*. Computers & Geosciences, Vol. 36, pp. 489-499 // Es un estudio enfocado a la evaluación de la calidad de MDE con un tamaño de malla de 10 a 100 m, obtenidos por métodos fotogramétricos, concretamente para este trabajo se utilizan MDE de 10×10 m que representan una franja de 10 Km de costa en el estuario del río Shannon en Irlanda. El objetivo del estudio es la evaluación de los riesgos de inundación de una zona de costa, para lo cual el empleo de un MDE con ciertas garantías de calidad es importante. La finalidad es demostrar los inconvenientes que los MDE de resolución media plantean en este tipo de estudios. Los datos utilizados como referencia para la determinación de la calidad de los MDEs son: 1) Datos GPS combinados, tanto de post procesado como RTK, con un total de 670 pdc, formando una malla de 40×40 m, con una incertidumbre en altitud comprendida entre 0,01 y 0,1 m; 2) un MDS a partir de datos TLS (27 millones de puntos en una malla de 6×6 cm), con una incertidumbre en altitud entre 0,006 y 0,047 m, estando siempre influidos los valores de la incertidumbre en los datos del láser escáner, en función de la cubierta vegetal sobre la que se trabaja. La validación de los MDE se llevó a cabo con el módulo *Geostatistical Analyst de ArcGIS*. Se utilizó un método de interpolación optimizado en el MDE para minimizar la incertidumbre producida por esa interpolación en la incertidumbre general del MDE. Ese algoritmo optimizado de interpolación estaba basado en el método *Kriging*, y mediante la validación cruzada se determina que el error medio de la interpolación es de 0,001 m, con una $\sigma = 0,25$ m. Con los datos GPS se validaron el 90% de la extensión del MDE que cubre los 10 Km de costa, obteniéndose $\mu = -0,61$ m y $\sigma = 1,79$ m, aumentando los errores al acercarnos a la línea de costa, lo que sugiere a los autores lo poco adecuado del MDE de resolución media para estudios de inundación. En la validación realizada con los datos del TLS se obtuvieron mayores incertidumbres, se emplearon en torno a 70.000 pdc en la validación final, obteniéndose $\mu = -1,66$ y $\sigma = 2,30$ m.
104. VAZE, J.; TENG, J.; SPENCER, G. (2010). *Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices*. Environmental Modelling & Software, Vol. 25, pp. 1086-1098 // Analiza la importancia de los MDE en el modelado hidrológico y en el cálculo de los diferentes índices hídricos. Presenta los resultados del análisis estadístico llevado a cabo para la determinación de la calidad de un MDE_{LiDAR} con paso de malla de 1 m. El área de estudio, que se subdivide en 6 zonas, se sitúa en Perricoota Forest (Australia), a lo largo del Río Murray, cubre una extensión de unas 32.000 Ha. Para validar los MDE se tomaron en campo mediante métodos topográficos un total de 11.000 pdc (con una incertidumbre vertical de 1 mm), que fueron elegidos de forma que la morfología del terreno quedara lo mejor representada posible. También se usó un MDE con paso de malla de 25 m, obtenido a partir de cartografía topográfica oficial (MDE_{cartografía}), con una equidistancia entre 10 y 20 m. Se trabaja con la altitud y la pendiente obtenida en los MDE. También se remuestra el MDE_{LiDAR} a los pasos de malla: 2 m, 5 m, 10 m y 25 m. En primer lugar, se compararon las altitudes de los pdc con el MDE_{LiDAR} de 1 m de paso de malla, con el MDE_{LiDAR} de 25 m de paso de malla

y con el $MDE_{\text{cartografía}}$, los resultados fueron: para el caso de 1 m de paso de malla, las diferencias medias eran menores de 0,4 m y las mayores diferencias (3,2 m) se dieron en zonas abruptas, para el caso de 25 m de malla en MDE_{LIDAR} , la diferencia media de altitudes es ligeramente superior a 1 m, siendo la máxima próxima a los 6 m, para el caso del $MDE_{\text{cartografía}}$, la diferencia media está por encima de los 4 m y la máxima diferencia próxima a los 7 m. En segundo lugar, se establecen gráficos que representan las diferencias de altitud entre los pdc y los valores de los MDE, se representan las diferencias media, máxima y mínima en todos los MDE considerados, observándose cómo aumentan ligeramente los valores mínimos en los MDE de 10 y 25 m de malla, mientras que los valores máximos de diferencias decrecen al aumentar el paso de malla. En tercer lugar, se representan las diferencias entre valores de pendiente del terreno, se observa cómo decrecen las diferencias en valores de pendiente conforme aumenta el tamaño del paso de malla, también se obtienen valores más altos en zonas abruptas o muy montañosas. Concluye que las características hidrológicas derivadas del MDE son sensibles tanto al tamaño de la malla como a la incertidumbre del MDE, que los límites de cuencas hidrográficas dependen también de ambos factores, siendo mejores los resultados obtenidos en el MDE_{LIDAR} con malla de 25 m que en el $MDE_{\text{cartografía}}$ con el mismo tamaño de malla.

105. WISE, S. (2011). *Cross-validation as a means of investigating DEM interpolation error*. Computers & Geosciences, Vol. 37, pp. 978-991 // Según el autor, uno de los grandes obstáculos en el análisis y evaluación de la calidad de MDE ha sido la escasez de datos con los que se realiza ésta evaluación. Para solucionar esta situación se propone remuestrear un conjunto de datos de muy alta resolución espacial, y luego, a partir de una resolución más baja, realizar una interpolación para obtener la resolución original, con lo que se obtiene un MDE perturbado que está afectado por valores de error que se distribuyen de forma homogénea por todo el MDE. El ensayo se realiza partiendo de diferentes resoluciones y con diferentes métodos de interpolación. El estudio se llevó a cabo con datos de una zona de Escocia con variedad de tipos de terreno. Se realizan un conjunto de análisis de distribución de frecuencias de error, variando la resolución (100, 200, 400, 800 y 1600 m de paso de malla) y el método de interpolación empleado (bilineal, ponderación inversa a la distancia, función de base radial, spline, polinomio local); también se realiza un análisis de autocorrelación espacial. Con una densidad de datos baja, el error tiende a una distribución gaussiana y tiene fuerte autocorrelación espacial, sin embargo, cuando la densidad aumenta los niveles de autocorrelación caen y la distribución se vuelve leptocúrtica con fuertes colas alrededor de cero. Comparando las incertidumbres (RMSE) de las elevaciones, con variables derivadas (pendiente, orientación, etc.) observan que a nivel de punto aislado hay poca correlación (ρ), sin embargo, a nivel global hay correlación entre el RMSE de elevación y el RMSE de pendiente, los valores de los coeficientes de correlación lineal (R^2) son 0,974 y 0,960 para la pendiente y orientación, respectivamente.
106. SCHMID, K.A.; HADLEY, B.; WIJEKOON, N. (2011). *Vertical Accuracy and Use of Topographic LIDAR Data in Coastal Marshes*. Journal of Coastal Research, Vol. 27, Nº 6ª, pp. 116-132 // Se analiza la exactitud de MDE obtenidos a partir de datos LiDAR con la perspectiva de aplicación a los estudios de zonas de humedales costeros y sus patrones de drenaje locales. Los problemas de penetración del pulso radar en las

zonas de vegetación húmeda hacen que la tecnología LiDAR se pierda exactitud en la descripción de los humedales. Se usan técnicas de clasificación para mejorar los MDE obtenidos. Uno de los métodos empleados es el método de “*Minimum Gridding Bin*”, el cual extrae la elevación más baja de una ventana de búsqueda definida por el usuario, y asigna este valor a la tesela de la malla establecida. Según los autores, a pesar de la pérdida de resolución, la aplicación de estas técnicas puede mejorar significativamente la exactitud vertical del MDE. Debemos tener en cuenta que los puntos de suelo desnudo en zonas de humedales pueden, aun así, tener un sesgo en la altitud determinada ya que la vegetación en este tipo de entornos es muy peculiar. El artículo analiza la disminución de los errores del MDE comparados con los datos brutos tal cual se reciben del sistema LiDAR. Así pues, contrastando con esos datos brutos se obtiene que el método de *Minimum Gridding Bin* con malla de 2×2 m da unas diferencias con respecto a los datos brutos del LiDAR de $\mu=0,34$ y $\sigma=0,40$ m; con malla de 4×4 m los valores son: $\mu=0,25$ m y $\sigma=0,30$ m; con malla de 6×6 m son $\mu=0,21$ y $\sigma=0,25$ m; con malla de 8×8 m, $\mu=0,13$ y $\sigma=0,17$ m; y finalmente con malla de 10×10 m, $\mu=0,10$ y $\sigma=0,12$ m.

107. YANG, L.; MENG, X.; ZHANG, X. (2011). *SRTM DEM and its application advances*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 32, nº 14, pp. 3875-3896 // El artículo presenta una breve revisión de los principios del SRTM, bases de datos existentes, métodos de relleno de huecos y exactitud de MDE SRTM. El trabajo realiza una detallada descripción de la aplicación de los MDE de SRTM en varios campos de investigación y ciencias que necesitan de los datos geoespaciales. Realiza una exposición detallada de cada uno de ellos (Geología, Geomorfología, recursos hídricos e Hidrología, Glaciología, evaluación de desastres naturales y medida de vegetación). La incertidumbre del MDE de SRTM viene dada por unas especificaciones que indican que la incertidumbre vertical absoluta es inferior a los 16 m. Se indica que en varias de las aplicaciones mencionadas se ha contrastado que nunca se ha superado ese valor especificado, estando siempre por debajo.
108. LIU, X. (2011). *Accuracy assessment of LiDAR elevation data using survey marks*. Survey Review. Vol. 43, nº 319, pp. 80-93 // Trata de la evaluación de la exactitud de los datos LiDAR explorando la posibilidad de usar los vértices geodésicos. Para ello utiliza los vértices, del estado de Victoria (Australia), que poseen una baja incertidumbre tanto vertical como horizontal (aprox. 0,03 m), y que son mantenidos por los servicios geodésicos australianos, y poseen una densidad de 23 vértices por Km². Estas marcas disponen tanto de coordenadas en planimetría como en altimetría respecto a los datum nacionales. Para el tipo de terreno considerado (combinación de vegetación y terreno abierto), se obtiene $\mu=0,33$ m y $\sigma=0,30$ m en las diferencias de altitud. Por otro lado, se examina la forma de obtener la elevación a partir de los datos LiDAR en las localizaciones de los pdc, para ello se debe realizar alguna interpolación bien a partir de los puntos más cercanos, o formar una cadena de triángulos alrededor del pdc en cuestión. Se analizan las diferencias en función del método de interpolación empleado, y para ello se utilizan cuatro métodos (ponderación inversa a la distancia, Kriging, TIN, punto más cercano). El resultado para el terreno de tipo combinado es de un valor de variación máxima en la media de las diferencias de 2 cm, siendo el método Kriging el que mejor comportamiento muestra.
109. GONZALES DE OLIVEIRA, C.; PARADELLA, W.R.; DE QUEIROZ DA SILVA, A. (2011). *Assessment of radargrammetric DSMs from TerraSAR-X Stripmap images*

in a mountainous relief area of the Amazon region. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 66, pp. 67-72 // Se analizan los datos adquiridos por estereopares de imágenes TerraSAR-X Stripmap para la obtención de MDS. Como contraste se utilizan medidas GPS en puntos del terreno, obteniendo puntos de apoyo del terreno para la obtención del MDS y puntos de control para la evaluación de la calidad del MDS. La evaluación se realizó usando el RMSE y calculando el error sistemático y la incertidumbre, estos dos últimos contrastados por la test t-Student y Chi-cuadrado, respectivamente. Finalmente se observa que estos MDS cumplen los requerimientos de calidad de los Estándares Brasileños para Cartografía de Clase A, a E50k.

110. ZANDBERGEN, P.A. (2011). *Characterizing the error distribution of lidar elevation data for North Carolina.* International Journal of Remote Sensing. Vol.32, nº2, pp. 409-430 // Se caracterizan los errores de un MDE LiDAR perteneciente al Programa de Cartografía de Inundaciones de Carolina del Norte (USA) y se encontraron evidencias de que el error vertical no se distribuye según una distribución normal, y que los valores atípicos son bastante frecuentes. Según el autor, el hecho de la no normalidad puede ser debido a atípicos, autocorrelación espacial de los errores, y procesos no estacionarios que subyacen a la ocurrencia de errores verticales (p.ej. diferente comportamiento según el tipo de cubierta). De toda la zona estudiada las áreas urbanas, a pesar de tener un error más elevado, son las que más se aproximan a una distribución normal del error, todo lo contrario que en áreas de suelo desnudo, esto contradice lo que de alguna manera está establecido por todos los investigadores de que en suelo desnudo el comportamiento de los errores de las mediciones de altitud LiDAR están más próximas de la distribución normal, también se observó que el valor de la pendiente no tiene influencia en el comportamiento de distribución de los errores. Finaliza recomendando una caracterización más completa y rigurosa de la distribución del error.
111. REES, W.G. (2011). *Assessment of ASTER global digital elevation model data for Artic research.* Polar Record. Vol. 48, pp. 31-39. // El objetivo es analizar la calidad del ASTER GDEM considerando la correlación espacial de los errores por medio de la semivarianza analizada en dos direcciones perpendiculares, con un alcance de hasta 130 m de distancia. En la comprobación experimental se trabajó con cinco zonas cerca del Ártico (Islandia, Noruega y Rusia) cubriendo unas áreas de 56, 58, 36, 130 y 126 Km², cada una de ellas. Como datos de referencia se obtuvieron los datos LiDAR de todas las zonas con un RMSE de 1 m en altura, menos en la zona de Rusia que se empleó la digitalización de mapas topográficos a E100k, con un intervalo de curvas de nivel de 20 m. Para todos los ASTER GDEM se dispone de la información de calidad que ofrece el sistema (el *Stacking* o número de pasadas de satélite que participan en la determinación de la altitud de una posición concreta). Como función de autocorrelación se emplearon tres: Modelo Exponencial Negativo, Modelo Gausiano y Modelo de Lorentz. No se encontraron diferencias significativas entre cada uno de los modelos. Se compararon 13.000 puntos en total. El resultado final muestra que, para indicadores de calidad mayores de 6, el RMSE tiene un valor entre 5 y 10 m, con un máximo de 50 m. Uno de los aspectos negativos de este MDE es que la adquisición de datos puede ser de algún momento comprendido entre el año 2000 y 2008, con el

consiguiente riesgo de variación de forma topográfica debido al paso del tiempo, sobre todo en zonas de glaciares.

112. ZANARDI, R.P.; ROLIM, S.B.A.; DE SOUZA, S.F.; MARANHÃO, M.R.A.; DE SOUZA FILHO, C.R. (2011). *DTM generation from a stereo pair acquired by the Chin-Brazilian Earth Resources Satellite (CBERS-2) and quality control of the altimetric information*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 32, nº 16, pp. 4683-4694 // Trata sobre la extracción de información altimétrica a partir de un estereopar adquirido por CBERS-2 (Cámara High Resolution Charge Couple Device) usando técnicas fotogramétricas, además de un análisis cuantitativo de la exactitud altimétrica. La zona de estudio se sitúa entre los municipios de Catalão (Estado de Goiás) y Perdizes (Estado de Minas Gerais), Brasil. Los puntos de control proceden de cartografía a E25k del Servicio Geográfico del Ejército Brasileño y del Instituto de Estadísticas y Geografía Brasileño. En esta cartografía la altitud presenta una incertidumbre de menos de 5 m en un 90% de los puntos. El área total cubre una extensión de 29.000 Km². En un análisis preliminar se seleccionaron 20 pdc obteniendo unos estadísticos de las incertidumbres de altitud de $\mu = 42,99$ m y $\sigma = 24,15$ m. Finalmente, se determina que el número adecuado de pdc debería ser al menos de 40 pdc. También se realizó una comparación del MDE con un MDE SRTM resultando en las diferencias unos valores de: $\mu = 13,83$ m y $\sigma = 19,01$ m, en este caso se había eliminado previamente un error sistemático detectado de 38 m, de origen desconocido. Se concluye que, una vez se elimina el error sistemático, el ajuste o coincidencia entre las altitudes del MDE con respecto a las del mapa topográfico y del SRTM es bastante alta.
113. REINOSO, J.F. (2011). *An algorithm for automatically computing the horizontal shift between homologous contours from DTMs*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, pp. 272-286 // Se cuantifica la discrepancia (distancia horizontal) entre dos MDE representados mediante curvas de nivel. La medida que se propone consiste en determinar el área encerrada entre dos curvas de nivel homólogas, cada una perteneciente a un MDE diferente. Lo novedoso del método planteado es la automatización total del proceso de cálculo de superficies entre curvas de nivel. Una de las principales dificultades del método planteado es la identificación de curvas homólogas, sobre todo en el caso de curvas abiertas y cortadas por los límites del MDE. Se plantea un problema de casado de elementos que no es trivial pues puede ser 1-0, 1-n, etc., para solucionar éste problema emplea un algoritmo con una profusa justificación matemática que cierra las curvas de nivel siguiendo el límite considerado, realizando pruebas de diferencias simétricas. Se realiza una aplicación para el cálculo de desplazamiento de curvas de nivel obtenidas a partir de MDE homólogos, concretamente 4 MDE (4 del ICA y sus homólogos del IGN, con un paso de malla de 10×10 m y 25×25 m, respectivamente). El estudio se realizó en cuatro zonas de Andalucía. Se calcula la diferencia media en altitud de cada MDE y su homólogo, y en valores de pendiente también, con el fin de comprobar la similitud entre MDE homólogos (p.ej. para las altitudes en la zona llana la media de diferencias fue $\mu = -0,003$ m y en la zona montañosa $\mu = -0,059$ m, valores más bajo y alto). En las zonas de montaña y, por tanto, de mayor pendiente, es donde se observa una distancia media entre curvas homólogas menor, un valor global medio de 2,87 m frente a los 3,98 m en zonas llanas.

114. MEYER, D., et.al. (2011). *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results*. Archive Center and Joint Japan-US ASTER Science Team // La evaluación de la calidad del ASTER GDEM 2 se llevó a cabo por distintos organismos (Ministerio de Energía, Transporte e Industria Japonés, NASA, USGS, etc.), se realizó utilizando diferentes productos de referencia, también se clasifica por zonas según el tipo de cubierta del suelo (vegetal, edificación, etc.). La evaluación vertical se desarrolló de forma local por el USGS y por un equipo de Japón, y globalmente mediante la NASA. Se realizó en un primer momento en U.S.A. (U.S.G.S.), contrastando con datos puntuales altimétricos de referencia, datos obtenidos por GPS, los resultados fueron de un $RMSE=\pm 17,01$ m al 95% del nivel de confianza. En Japón se utilizó el MDE, desarrollado por el *Geographical Survey Institute* (GSI DEM), como datos de referencia para la evaluación de la exactitud, se obtuvo un valor medio de error de $\mu=-7.4$ m, siendo más elevado en las zonas de bosque ($\mu=8,68$ m) y menos en zonas de vegetación más pequeña en altura ($\mu=-1,32$ m), siendo de $\mu=-0,96$ m en zonas de suelo desnudo. La Evaluación a nivel global se realiza tomando como datos de referencia el MDE SRTM DTED2, con un $\mu=-1,572$ m y un $\sigma=\pm 8,826$ m. También se realizó a nivel global un contraste con datos ICESat, obteniendo los resultados por zonas que algunos casos coinciden con continentes completos, así pues, en Euroasia se utilizó el máximo de 15264903 pdc y en Nueva Zelanda el mínimo con 16836 pdc. El valor más elevado de RMSE se obtiene en Norte América $RMSE=\pm 11,92$ m, mientras que en Australia se obtiene el valor más bajo de $RMSE=\pm 7,62$ m, en las zonas de suelo desnudo, sin vegetación ni edificaciones, se obtiene un RMSE máximo en Nueva Zelanda, $RMSE=\pm 11,41$ m, y el más bajo en Norte América, $RMSE=\pm 6,18$ m.
115. SCHWENDEL, A.C.; FULLER, I.C.; DEATH, R.G. (2012). *Assessing DEM interpolation methods for effective representation of upland stream morphology for rapid appraisal of bed stability*. River Research and Applications Vol. 28, pp. 567-584 // Este estudio se desarrolla en el dominio de aplicación propio de las cuencas de los ríos en zonas de alta montaña, con una finalidad hidrológica y ecológica de estimar sedimentación. Se analiza la calidad de los MDE útiles para esta aplicación, en función del método de interpolación empleado para la obtención de la malla. Los datos para la formación de los MDE proceden de capturas DGPS. La zona de trabajo es Ruahine y Tararua Ranges en Nueva Zelanda, variando la extensión de las áreas seleccionadas entre 132 y 2.438 m², con una densidad de puntos de 0,6 a 11,7 puntos/m². Se emplearon varios métodos de interpolación: triangulación con interpolación lineal, vecino natural, Kriging, función de base radial multicuadrática, método de Shepard modificado y ponderación inversa a la distancia. Según los autores, el análisis de las diferencias de altitudes entre los MDE obtenidos por cada método de interpolación, comparado con los datos originales, no determina un claro método de interpolación ventajoso, ya que el valor medio de las diferencias entre métodos es menor de 1 mm. Una de las conclusiones es que el método de interpolación varía en función de la pendiente del terreno y su rugosidad, es decir, su morfología, y no existe, por tanto, un método más adecuado que otro de forma general. La triangulación con interpolación lineal es comúnmente el método más usado en la generación de MDE, pero también es muy adecuado para estudios comparativos de la topografía de los canales en el ámbito hidrológico. Quizá este motivo lleva a los autores a recomendar este método

- como exhaustivo y fiable para la generación del MDE en estudios medioambientales y ecológicos cuyo objetivo es evaluar la variación espacial por la erosión y deposición a varias escalas y para la investigación de la estabilidad del lecho.
116. SHI, X.; LYNSEY, G.; LONG, R.; DEKETT, R.; PHILIPPE, J.; BURKE, T. (2012). *A comparison of LiDAR-based DEMs and USGS-sourced DEMs in terrain analysis for knowledge-based digital soil mapping*. Geoderma, Vol. 170, pp. 217-226 // Este trabajo tiene como objetivo mejorar la información utilizada en los procesos de elaboración de la Cartografía Digital de Suelos basada en el conocimiento por parte de *United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service*. Se comparan (en Vermont, USA), un MDE obtenido por métodos LiDAR y un MDE basado en datos del USGS. La comparación se realiza por medio de un parámetro clave en la elaboración de estos mapas: el gradiente de pendiente. Se calcula el gradiente de pendiente en ambos MDE y se compara con valores medidos en campo en una muestra de 159 puntos. Se utilizaron varios pasos de malla para los MDE (10, 5 y 1 m), y varios tamaños de vecindad a la hora de calcular la pendiente (10 y 30 m) y, además, se cambió la forma de la vecindad (circular y cuadrangular). Como resultado más destacable y predecible, el MDE que ofrece la mejor calidad es el obtenido por LiDAR. La vecindad de 30 m da mejores resultados que la vecindad de 10 m, y la vecindad circular mejor que la vecindad cuadrangular. En terrenos llanos los valores de pendiente procedentes del MDE tienden a sobreestimar los medidos y, en terrenos quebrados lo contrario, el punto de inflexión parece está en el 20% de valor de pendiente.
117. TAROLLI, P.; SOFIA, G.; DALLA FONTANA, G. (2012). *Geomorphic features extraction from high-resolution topography: landslide crowns and bank erosion*. Natural Hazards, Vol. 61, pp. 65-83 // Se desarrolla un método para la extracción de las características geomorfológicas del relieve de forma automática. El método se basa en unos umbrales derivados de un análisis estadístico de la variabilidad en la curvatura del relieve (segunda derivada). Este estudio se llevó a cabo al este de los Alpes Italianos. Los resultados reflejan la fuerte dependencia del cálculo de la curvatura con la escala de trabajo considerada, y la escala debe estar acorde a las características a extraer. Se utilizó una ventana de trabajo de 10,5 m, fue la ventana óptima para una buena extracción de características geomorfológicas en el terreno considerado, probablemente en otras áreas de diferentes morfologías sea más adecuado otro tamaño de ventana, ya que ventanas muy pequeñas no identifican bien los elementos geomorfológicos y las ventanas excesivamente grandes tampoco.
118. LIU, X.; HU, P.; HU, H.; SHERBA, J. (2012). *Approximation Theory Applied to DEM Vertical Accuracy Assessment*. Transactions in GIS. Vol. 16, nº 3, pp. 397-410 // Se demuestra que la teoría de propagación de errores no debería aplicarse a la evaluación de la exactitud, ya que los errores que intervienen en un MDE no son aleatorios, no siguen una distribución normal y no son estacionarios. Se presenta la Teoría de la Aproximación como alternativa para la evaluación de la calidad en MDE, aplicándola a MDE obtenidos a partir de curvas de nivel de mapas topográficos a E24k y de MDE con un paso de malla de 7.5 minutos de arco de meridiano perteneciente al USGS, y utilizando un método de interpolación lineal. La extensión del MDE con el que se trabaja es de 2,5 minutos de arco de meridiano, con un paso de malla de 3,75 m. Se obtiene una expresión que facilita la discrepancia máxima en cada punto del modelo, esta expresión depende de la segunda derivada sobre el terreno y de la distancia entre

puntos muestreados sobre los que se interpola. Con la Teoría de la Aproximación se puede estimar el valor de cada uno de los componentes del error del MDE (error de propagación y error de interpolación) pudiendo actuar antes de la producción del MDE y también una vez producido. Viendo cuáles son las zonas de mayor error, o de qué componente es más elevado, se podrán tomar medidas para su atenuación. Los resultados muestran que, en el método de interpolación lineal, los errores siempre se encuentran por debajo de 3,80 m.

119. GRUBER, A.; WESSEL, B.; HUBER, M.; ROTH, A. (2012). *Operational TanDEM-X DEM calibration and first validation results*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 73, pp. 39-49 // El objetivo es un procedimiento para la estimación y corrección de parámetros, así como la eliminación de errores sistemáticos en altitud obtenida por el sistema TanDEM-X⁵. El procedimiento se basa en un ajuste de mínimos cuadrados por bloques usando los datos del ICESat GLA 14 para obtener los puntos de apoyo terreno que servirán en la confección de los MDE. Como información de referencia se utiliza MDE de mayor exactitud y perfiles topográficos obtenidos mediante GPS. Los resultados de las diferencias entre el MDE TanDEM-X y los MDE de mayor exactitud, una vez realizados los ajustes, dan los siguientes valores: $\mu = -0,60$ m y $\sigma = 1,25$ m; y los resultados de la comparación con las medidas GPS, también una vez realizado el ajuste, dan los siguientes valores: $\mu = -0,80$ m y $\sigma = 0,98$ m.
120. DEHVARI, A.; HECK, R.J. (2012). *Removing non-ground points from automated photo-based DEM and evaluation of its accuracy with LiDAR DEM*. Computers & Geosciences. Vol. 43, pp. 108-117 // Se crearon tres MDE, uno LiDAR, otro por Fotogrametría y otro a partir de curvas de nivel digitalizadas, utilizando diferentes herramientas para ello. La nube de puntos obtenida a partir de cada una de las fuentes fue reproyectada al mismo sistema de referencia y se formó un MDE con un paso de malla de 1 m. En el caso de Fotogrametría se utilizó software para automatizar el proceso de obtención. En el caso de LiDAR se realizó un krigeage para la obtención de la malla y se utiliza un algoritmo para la clasificación de puntos y así poder eliminar los puntos no pertenecientes al suelo (debido a la existencia de construcciones, árboles, etc.) y rellenar el hueco dejado mediante superficies de tendencia. En cuanto a las incertidumbres, magnitudes y patrones de distribución en los distintos MDE, se evaluaron por medio de 120 pdc obtenidos por una fuente de mayor exactitud que todas las consideradas en este estudio. Las conclusiones son: los MDE LiDAR son los menos exactos en planimetría, pero los más exactos en la componente altimétrica, y no hay diferencias considerables en parámetros derivados (pendiente, orientación, etc), y el cartografiado de elementos como carreteras parecen ser más reales en LiDAR. Finalmente el desarrollo de métodos automatizados de obtención del MDE fotogramétricos, gracias al desarrollo reciente de métodos de procesamiento que

⁵ En junio de 2010 se lanzó el satélite alemán TanDEM-X que, junto con su gemelo TerraSAR-X, orbita en formación cercana posibilitando interferometría SAR en cada pasada. El objetivo de la misión TanDEM-X es la obtención de un MDE global con una incertidumbre altimétrica absoluta de 10 m y de 2 m en relativo. A pesar de la exhaustiva calibración del instrumento, de una órbita y una base-línea muy exacta, existen algunos errores sistemáticos en altitud (p.ej. compensaciones e inclinaciones), que están del orden de algunos metros y que han de ser ajustados para conseguir un buen MDE.

mejoran la resolución y rapidez de resultados, los hace muy competitivos con respecto a MDE LiDAR.

121. CHEN, C.; FAN, Z.; YE, T.; DAI, H. (2012). *A robust estimator for the accuracy assessment of remote-sensing derived DEMs*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 33, nº 8, pp. 2482-2497 // Cuestiona la suposición de que los errores en los MDE tienen un comportamiento según una distribución normal, especialmente en el caso de datos procedentes de LiDAR, donde muchas veces se obtienen altitudes sobre la copa de los árboles, edificaciones, etc., y además en ellos existen errores atípicos debidos a fallos del sistema, errores de lectura, etc. Así pues, según los autores, la aplicación de la regla 3σ tiene sus inconvenientes, sobre todo cuando no se dispone de un número grande de observaciones. En estadística existen estimadores robustos tales como el estimador-M, que se puede emplear para disminuir la influencia de los datos de distribución no normal. En la parte experimental se trabaja sobre los MDE de la zona de Shandong, China, con 0,04 Km² de extensión, y se aplica el estimador robusto M, que llaman REMP (A Robust Estimator based on the M-estimation Principle). Los MDE se tomaron con LiDAR, y 100 puntos de control en cada zona con una incertidumbre estándar de ± 2 cm, capturados con el sistema GPS-RTK. El procedimiento seguido ha sido calcular las incertidumbres por medio de estimadores clásicos y robustos REMP, introducir errores en las altitudes de algunos puntos del MDE y volver a calcular la incertidumbre del MDE, así se han obtenido 5 grupos de datos diferentes. Las diferencias máximas entre los valores de los estadísticos verdaderos y de los modelos contaminados alcanzan un valor de $\mu=13$ cm y $\sigma=65$ cm. Ya que el FGDC, a través del NSSDA (FGDC 1998, ver referencia 35) no contemplan la posibilidad de la existencia de errores groseros, atípicos y sistemáticos, las medidas de evaluación de la exactitud REMP propuestas en este artículo pueden ser muy prometedoras. Planteada la posibilidad de pasar de medidas globales de incertidumbre para la calidad a mapas, a las que facilitan la calidad por zonas en lugar de dar un valor único para todo el MDE.
122. XIAO, L.; LIU, H. (2012). *A novel approach for quantitative assessment of DEM accuracy using reconstructed contours*. International Conference on Environmental Science and Engineering. Procedia Environmental Sciences. Vol. 12, pp. 772-776 // Se expone un método para evaluar la exactitud de un MDE por medio de curvas de nivel. Las curvas de nivel originales son las que dan lugar a la generación del MDE ráster, que posteriormente es evaluado reconstruyendo de nuevo las curvas de nivel. Se analizan las diferencias entre las áreas encerradas por cada curva de nivel, la generada a partir del MDE y la original, obteniendo un valor cuantitativo que se le llama HAD (*Horizontal Area Deviation*), a mayor valor de HAD la exactitud será menor. Para la interpolación utiliza la técnica de interpolación ANUDEM propia del análisis del terreno. Finalmente, además se calcularon los RMSE en un conjunto de zonas, comparando altitudes del MDE con puntos extraídos de las curvas de nivel originales. Tanto el valor de RMSE como de HAD eran concordantes, es decir, presentaban tendencias similares. Se observó el aumento de RMSE y HAD al aumentar el tamaño de la malla del MDE. Finalmente se concluye que HAD es más fiable porque se considera todo el MDE, mientras que el cálculo de RMSE sólo intervienen los puntos dónde se ha considerado la altitud.
123. BÜHLER, Y.; MARTY, M.; GINZLER, C. (2012). *High resolution DEM generation in high-alpine terrain using airborne Remote Sensing techniques*. Transaction in GIS,

Vol. 16(5), pp. 635-647 // Se contraponen dos técnicas para la adquisición de datos y posterior elaboración de MDS y MDE en zonas de alta montaña. La zona de estudio está localizada al suroeste de Suiza en el Mattertal -con altitudes que van desde los 1.400 a los 4.500 m-. Por un lado, se obtienen los MDS con LiDAR sobre helicóptero con una densidad de 5 a 10 pto/m², que se consideran como datos de referencia. También se dispone de un MDS de la misma zona obtenido con un ALS modelo ADS80 (Leica TM) y con una resolución espacial de 0,25 m. La zona total tiene una extensión de 127 Km². Para describir y analizar la incertidumbre se han empleado los estadísticos clásicos, suponiendo que la distribución de los errores es normal (RMSE, σ y μ). Se eliminan los atípicos con la regla $\mu \pm 3\sigma$. La comparación arroja valores de RMSE de 0,8 a 1,19 m en general. Las imágenes del escáner con poca iluminación dan peores resultados de RMSE, y las zonas de fuerte pendiente también. Los resultados empeoran a partir de los 50° de inclinación, en los que el RMSE supera los 2 m. Se comparan ambas técnicas desde el punto de vista de la rentabilidad, siendo para zonas grandes más rentable la fotogrametría, aunque el LiDAR sigue siendo una metodología más precisa y exacta. Según este estudio las técnicas LiDAR son 50 veces más caras por unidad de superficie (p.ej. Km²).

124. LEONARDI, F.; ALMEIDA, C.; FONSECA, L.; TOMÁS, L.; ALBUQUERQUE, P.G.; OLIVEIRA, C. (2012). *Elevation Accuracy Assessment of a DSM and DTM generated for an Urban Area from the ALTM 2025 Airborne Laser Scanning Sensor*. Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications // Se aplica las comprobaciones que establece el Padrão de Exatidão Cartográfica de Brasil a datos obtenidos con un ALS en un sector de la ciudad de Uberlandia (con edificios altos, zonas verdes y residenciales) (Minas Gerais, Brasil). Se emplearon 42 pdc medidos con GPS. El método de evaluación se aplicó a un MDS y un MDT, una vez filtrados los datos. Para el MDS el test de tendencia muestra la existencia de un sistematismo, el test de exactitud muestra que es acorde a lo establecido para un producto a E5k ($\sigma=0,25$ m para la diferencia de altitudes). Para el MDE se ha obtenido lo siguiente, test de tendencia que muestra la existencia de un sistematismo aún más elevado, y el test de exactitud da igual que en el caso del MDS, lo que estaría acorde para un producto a E5k, obteniéndose una $\sigma=0,25$ m.
125. ZHANG, W.; WANG, W.; CHEN, L. (2012). *Constructing DEM based on InSAR and the Relationship between InSAR DEM's Precision and Terrain Factors*. Energy Procedia, vol. 16, pp. 184-189 // Se obtiene un MDE mediante tecnología InSAR, a partir de imágenes SAR de ENVISAT en la ciudad de Bam, Iran. Se realiza una comparación de éste MDE con el de SRTM-3. La incertidumbre del MDE InSAR viene afectada principalmente por los factores topográficos, la base-línea espacial, base-línea temporal, retraso atmosférico y otros factores. La comparación MDE InSAR vs SRTM-3 da una diferencia media de altitudes de 12,5 m. Analizan la relación entre la incertidumbre del MDE y la pendiente y orientación, observando que la incertidumbre aumenta con el aumento de la pendiente, no detallando el proceso seguido para el cálculo, no ofrecen valores cuantitativos.
126. WISE, S. (2012). *Information entropy as a measure of DEM quality*. Computers & Geosciences. Vol. 48, pp. 102-110 // Trata de buscar una medida mejor de la calidad de los MDEs, se habla de los inconvenientes de las medidas únicas o globales de calidad, ya que no tienen en cuenta la distribución espacial de la misma (p.ej. el valor

del RMSE). Se basa en el estadístico de Shannon relativo a la entropía, que surgió en un estudio de cómo diseñar un sistema que transmitiera un mensaje de un lugar a otro con gran exactitud. El valor de la entropía aplicado a este campo hace que debamos tener en cuenta dos aspectos: 1) La entropía es una medida del número de valores diferentes en el conjunto de datos y sus proporciones relativas, y no afectado por su posición, 2) la entropía no es una medida de si los valores son correctos o no. Por tanto se pueden establecer tres argumentos para el uso de la entropía en relación a los MDE: 1) Que la entropía es algo relativo a la cantidad de información en un MDE y a la variabilidad espacial de los valores de altitud (p.ej. un plano horizontal tendría una entropía de cero, al tener todos sus puntos la misma elevación, a mayor variación de altitudes mayor entropía, siendo máxima en un plano inclinado), 2) que el suavizado de un MDE conduce a una pérdida de entropía ya que implica pérdida de valores, 3) que la generalización o remuestreo de un MDE conduce a una pérdida de entropía y por tanto a una pérdida de calidad. Este último argumento queda cuestionado ya que al reducir el número de datos en el MDE puede reducir la entropía, sin embargo, no tiene por qué ser siempre así, ya que deberíamos tener en cuenta la proporción relativa de cada intervalo de altitud en el nuevo cálculo de la entropía (la entropía depende tanto del número de altitudes como de su proporción relativa) pudiéndose elevar el valor de la entropía o mantenerse en el nuevo MDE generalizado. Para todo esto se desarrolló un índice, el SVM (*Spatial Variability Measure*), que mide la diferencia entre la entropía y el valor máximo dado el número de intervalos de altitud considerados. Se llevaron a cabo experimentos prácticos en una muestra de MDEs del Ordnance Survey con 50 m de paso de malla (PANORAMA DEM), para una zona de Escocia. Se comprobó que al generalizar o remuestrear un MDE, efectivamente la entropía disminuía, en el caso del suavizado del MDE no hay una relación clara con la entropía, ya que el suavizado introduce dos cambios opuestos en el histograma de elevaciones (borra valores extremos, reduce entropía, pero también hace que valores vecinos sean más similares, incrementa la entropía). Se comprueba finalmente que la entropía es una medida de ciertas propiedades en la distribución de frecuencias de las altitudes y no está relacionada directamente con la calidad de la información altimétrica, en algunos casos se puede establecer una relación entre ambas, tales como la bajada de entropía en un MDE generalizado, en otros casos, tales como los cambios causados por el suavizado, la relación es muy débil para formar una base interpretable. Es muy complicado y se debe tener cuidado con el uso de la entropía para establecer la calidad de un MDE y en aquellos casos que se haga han de ser observados con cuidado.

127. TARQUINI, S.; VINCI, S.; FAVALLI, M.; DOUMAZ, F.; FORNACIAI, A.; NANNIPIERI, L. (2012). *Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web*. Computers & Geosciences. Vol. 38, pp. 168-170 // Este trabajo presenta un MDE de 10 m de paso de malla para todo el territorio italiano, TINITALY/01. Este MDE se ha obtenido a partir de diversas fuentes de datos, pero principalmente a partir de curvas de nivel y puntos de elevación medidos directamente en campo. TINITALY/01 se compara con dos MDE de ámbito global y con una menor resolución espacial o mayor paso de malla, uno de ellos es el SRTM con paso de malla de 90 m y el ASTER DEM con paso de malla de 30 m y, finalmente, un MDE derivado de LiDAR. Por otro lado, se presenta también un servicio web de anáglifos, basado en este MDE, para la compresión y observación de la morfología del territorio a nivel nacional. Para la

evaluación de exactitud del MDE se seleccionó una zona próxima al Monte Etna, de la cual se disponía de datos topográficos derivados de LiDAR con una elevada exactitud. Se obtuvieron un RMSE= 1,98 m, mientras que para el SRTM y ASTER se obtuvieron unos RMSE de 7,78 y 9,36 m, respectivamente.

128. MUKHERJEE, S.; JOSHI, P.K.; MUKHERJEE, S.; GHOSH, A.; GARG, R.D.; MUKHOPADHYAY, A. (2013). *IU accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM)*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. Vol. 21, pp. 205-217 // Se evalúa la exactitud de los MDE considerados *open source* tales como ASTER GDEM y SRTM (se podrían incluir algunos más como GTOPO, etc.) por su libre disponibilidad. Se utilizan tres fuentes de mayor exactitud: pdc medidos con GPS-RTK, pdc obtenidos a partir de hojas del Mapa Topográfico pertenecientes al *Survey of India* y con un MDE procedente de Cartosat MDE que posee un paso de malla de 10×10 m. La zona de estudio está situada al oeste de Shiwalik Himalaya, con una extensión de 27×27 Km. Las diferencias con respecto al MDE Cartosat dan valores de RMSE=12,62 m y 17,76 m en ASTER y SRTM, respectivamente. Se realizan otras evaluaciones contrastando valores de varianza de las altitudes por sectores de altitud y valores de pendiente entre MDE. También se observa que conforme aumenta la pendiente del terreno el valor de las diferencias en altitud aumenta, así pues, para una pendiente de 2° se obtiene RMSE= 9,22 m en el MDE ASTER y RMSE=9,44 m en el MDE SRTM, mientras que en una pendiente mayor de 20° el valor de RMSE> 22,25 m en el MDE ASTER y RMSE>17,59 m en el MDE SRTM. En el contraste de pendientes calculadas en los MDE ASTER y SRTM frente a las calculadas en el MDE Cartosat dan valores de incertidumbre de $\mu=-1,21^\circ$ y $\mu=-2,54^\circ$ y RMSE = 7,27° y RMSE = 8,18° para los MDE ASTER y SRTM, respectivamente.
129. LI, P.; SHI, C.; LI, Z.; MULLER, J.P.; DRUMMOND, J.; LI, X.; LI, T.; LI, Y.; LIU, J. (2013). *Evaluation of ASTER GDEM using GPS benchmarks and SRTM in China*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 34, n° 5, pp. 1744-1771 // Se trata de un estudio detallado de evaluación de la exactitud del ASTER GDEM en una zona de China. Se seleccionan cinco áreas con características distintas, tanto en morfología del terreno como en tipos de cubiertas de la superficie. Para la evaluación de la calidad se realiza un contraste con un conjunto de pdc cuyas coordenadas fueron obtenidas mediante GPS (con incertidumbre centimétrica). También se ha realizado una comparación con el SRTM DEM versión 4.1 del *Consultative Group of International Agriculture Research Consortium for Spatial Information*. Para la incertidumbre vertical del ASTER GDEM se obtiene un RMSE = 26 m utilizando como referencia los pdc, mientras que utilizando el MDE SRTM se obtiene un RMSE = 23 m. Los errores se pueden atribuir al tipo de cobertura de la superficie y a cuerpos de agua continentales no definidos.
130. SEFERCIK, U.G.; OZENDI, M. (2013). *Comprehensive comparison of VHR 3D spatial data acquired from IKONOS and TerraSAR-X imagery*. Advances in Space Research. Vol. 52, pp 1655-1667 // Se comparan MDE de alta resolución obtenidos con IKONOS y TerraSAR-X. En el caso de imágenes SAR de los cuatro métodos utilizados para la obtención de MDE (radragrametría, clinometría, polarimetría e interferometría) utiliza el método de interferometría, debido a su menor coste y a los productos de alta calidad obtenidos. En el caso de IKONOS se han empleado imágenes pancromáticas. El área de estudio está situada en Estambul, con una extensión de 80

Km², y un desnivel total de, aproximadamente, 90 m. Como MDE de referencia se utiliza uno obtenido a partir de cartografía a E1k, generada por Fotogrametría Digital. Para la evaluación de la calidad se establecen dos parámetros: exactitud y visualidad entendiendo la visualidad como la expresión realista del terreno. En este trabajo la exactitud es la diferencia 3D (vertical y horizontal) del MDE evaluado con respecto al de referencia. Se establecen dos tipos de exactitud, la absoluta y la relativa, la primera obedece a la exactitud general del MDE evaluado, mientras la segunda fija la atención en la conformidad interna del modelo basándose en la relación de los nodos vecinos de la malla. Para la evaluación de la exactitud relativa también se ha empleado el análisis de la estructura de las curvas de nivel. Todos los modelos empleados, tanto los evaluados como el de referencia, se ha procurado que tengan una buena superposición geométrica y geográfica, y se les ha dotado del mismo paso de malla (1×1 m). Por otro lado, la visualidad, este trata de evaluar la sensación visual de los elementos topográficos representados que debe ser lo más realista posible. Así, el MDS SRTM C-band, con un paso de malla de 90×90 m y una incertidumbre vertical de 2,5 a 5 m, tiene una calidad visual muy baja en términos de su capacidad para la representación topográfica de la zona. En la evaluación de la visualidad se empleó el software LISA. Los resultados muestran siempre bastante similitud en el comportamiento de ambos modelos, siendo siempre algo más favorable al modelo de IKONOS, por ejemplo, en la exactitud absoluta considerando todos los tipos de suelo el RMSE está entorno a los 7 m en ambos modelos.

131. SHEN, Z.Y.; CHEN, L.; LIAO, Q.; LIU, R.M.; HUANG, Q. (2013). *A comprehensive study of the effect of GIS data on hydrology and non-point source pollution modeling*. Agricultural Water Management. Vol. 118, pp. 93-102 // Se afronta la evaluación de la calidad MDE desde la perspectiva de las aplicaciones hidrológicas. El estudio tiene lugar en la región de Daning (4.426 km²) localizada en el Área Reservada de las Tres Gargantas, China. Se realiza un modelado hidrológico mediante el modelo SWAP (Solid Water Atmosphere Plant). Se emplean datos ASTER GDEM, y para observar la influencia sobre el modelado hidrológico se emplearon varias resoluciones (30 × 30 m, 40 × 40 m, 90 × 90 m y 200 × 200 m). Los parámetros observados para cada resolución o espaciado de malla son: Flujo, Sedimentación, valores de Nitrógeno adjunto y disuelto, etc. Se determina la variación porcentual de esos valores, según el modelado SWAP, para cada MDE de resolución diferente. Concluye que las predicciones del modelo SWAP de sedimentos decrecen sustancialmente con el paso de malla más grande, mientras que la escorrentía y el modelado de Nitrógeno no son sensibles al paso de malla. Finalmente se adopta el paso de malla de 30×30 m como el óptimo.
132. BARNEVELD, R.J.; SEEGER, M.; MAALEN-JOHANSEN, I. (2013). *Assessment of terrestrial laser scanning technology for obtaining high-resolution DEMs of soils*. Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 38, pp. 90-94 // El objetivo es poner de manifiesto lo adecuado de la tecnología láser escáner terrestre para la obtención de MDE relativos a microtopografía. El láser escáner utilizado ofrece una incertidumbre estándar, según el fabricante, de 6 mm en los primeros 50 m de medición, dependiendo de muchos más factores (temperatura, humedad del suelo, viento, ángulo de incidencia, distancia, etc.). El lugar de estudio fue una zona del sur de Noruega. Para obtener los MDE de trabajo, se discretiza el terreno en celdas de tamaño variable (0,02 a 0,10 m), asignando un valor de Z a cada celda, el valor de la incertidumbre proviene de la

desviación estándar de las observaciones del interior de cada celda. La incertidumbre se expresaba como uno menos la fracción del número de celdas que obtuvo una Z que difería significativamente con respecto a un MDE de referencia, siendo éste obtenido con otro escáner. Varias nubes de puntos obtenidas de las mismas zonas pero desde 4 puntos de vista distintos, se testearon contra cada uno de ellos mediante el test T de Welch, para muestras con varianzas desiguales. Los resultados dan valores similares cuando comparamos los MDE en diferentes tomas de diferentes momentos, es decir según la rugosidad del terreno (surco del arado). Los valores de incertidumbre oscilan entre RMSE €[[7,1; 4,9] mm. Los aspectos que más afectan a la incertidumbre son la pendiente debido al ángulo de incidencia del haz láser sobre el terreno y el espaciamiento en los datos.

133. COSTANTINO, D.; ANGELINI, M.G. (2013). *Production of DTM quality by TLS data*. European Journal of Remote Sensing, Vol. 46, pp. 80-103 // Se implementa un algoritmo de interpolación mediante mínimos cuadrados, diseñado para generar MDE a partir de datos en malla pseudo-regulares, por ejemplo, datos de TLS. Los valores interpolados se obtienen a partir de una compensación por mínimos cuadrados. La zona de estudio es un camino de tierra recto con una longitud de 105 m, y un desnivel no muy significativo, pendientes positivas y negativas, y ubicado entre la ciudad de Bari y Taranto (Italia). En primer lugar, se obtuvieron 180 puntos del camino por métodos topográficos clásicos, los mismos puntos se midieron también mediante GPS-RTK, posteriormente se realizó una toma de datos mediante el TLS modelo HDS 3000 (Leica™) sobre trípode, con una resolución de escaneo de 5×5 cm. El primer contraste se realiza entre puntos del escaneo próximos a la estación TLS (situada en varias posiciones: en el centro de la calle, y en los extremos) con respecto a los mismos puntos cuyas altitudes se obtienen por interpolación de los dos puntos más próximos obtenidos por Topografía Clásica. Las diferencias en altitudes son mínimas (0,005 m) hasta los 80 m de distancia a la estación del escáner, aumentando a partir de ahí (0,014 m). Por último, se aplica el algoritmo desarrollado para obtener una malla regular (pseudo-regular) de puntos a partir del levantamiento con el escáner, calculando las alturas compensadas de parte de la nube de puntos del escáner. En cada iteración del algoritmo propuesto la nube de puntos que interviene en la interpolación de forma ponderada se va ampliando, y también se densifica en cada iteración el paso de malla. Como partida se establecen los datos topográficos disponibles (180 puntos) para la compensación por mínimos cuadrados. En la cuarta iteración el proceso se para, cuando se obtiene un paso de malla de aproximadamente 0,20 m. Finalmente, tanto el MDE generado por este algoritmo, como el MDE obtenido por un software comercial (Cyclone) con el mismo paso de malla, se contrastan con las alturas de los puntos del escáner, siendo las diferencias menores en el caso del algoritmo propuesto (4,7 mm) frente al software comercial (7 mm).
134. MOZAS-CALVACHE, A.T.; UREÑA-CÁMARA, M.A.; PÉREZ-GARCÍA, J.L. (2013). *Accuracy of contour lines using 3D bands*. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 27, nº 12, pp: 2362-2374 // Se pone de manifiesto la dualidad existente en los estándares de calidad posicional separando la componente altimétrica de la planimétrica y por ello en este trabajo se propone la comparación del MDE por medio de su expresión mediante curvas de nivel. Se consideran dos fuentes potenciales de incertidumbre: la planimétrica (2D) y la

altimétrica. Los autores consideran que al ser elementos lineales, las curvas de nivel, se pueden aplicar métodos basados en la banda de incertidumbre, adoptándose la creación de un orlado entorno a la curva de nivel a ser controlada. La incertidumbre altimétrica se establece por la línea de máxima pendiente (que une curvas de nivel contiguas). El método se aplica a un conjunto de curvas de nivel, utilizando posteriormente un conjunto de puntos de un MDE oficial para controlar las líneas. Se analiza qué cantidad de puntos caen dentro de los orlados de distinta anchura. De esta forma se obtiene el porcentaje de puntos que caen en el área de incertidumbre de una curva de nivel. La zona de trabajo se sitúa en Andalucía, se ha utilizado el mapa topográfico de Andalucía E10k como fuente de las curvas de nivel. Los puntos de control provienen de un MDE del Instituto de Cartografía de Andalucía. El 90% de los puntos incluyen en un ancho de orlado de 16 m y un 50% con 3 m. Las zonas de menor pendiente son las de mayor incertidumbre.

135. HÖHLE, J. (2013). *Assessing the positional accuracy of airborne laser scanning in urban areas*. The Photogrammetric Record. Vol. 28, Nº142, pp: 196-210 // Se propone un nuevo método para la evaluación de la exactitud posicional de puntos LiDAR basado en las superficies planas definidas por los tejados de los edificios. Tres de tales planos intersectan en un punto y las coordenadas de varios de esos puntos se comparan con los puntos obtenidos por fotogrametría aérea. A partir de las diferencias obtenidas se derivan las medidas de incertidumbre posicional. Un test práctico con el modelo propuesto revela una baja incertidumbre en la intersección de puntos. La incertidumbre absoluta posicional de la nube de puntos LiDAR se determinó con medidas estadísticas estándar y robustas. Las últimas siempre producen valores más pequeños. La comparación de las coordenadas planimétricas de los pdc, entre láser escáner con las coordenadas espaciales de los mismos 53 puntos derivados por Fotogrametría, revelan una desviación circular de 0,32 m. En la componente vertical, las diferencias no se distribuyen según la normal. El valor de la mediana es próximo a cero y el RMSE es de 0,14 m. El percentil 95 es de 0,30 m. Las medidas para la altimetría dan valores de incertidumbre mayores que en coordenadas planimétricas. En planimetría el test revela errores sistemáticos y un sesgo en la distribución de los errores, por lo tanto, se aplican medidas robustas, el percentil 95 tiene un valor de 0,64 m.
136. KINSEY-HENDERSON, A.E.; WILKINSON, S.N. (2013). *Evaluating Shuttle Radar and interpolated DEMs for slope gradient and soil erosion estimation in low relief terrain*. Environmental Modelling & Software, vol. 40, pp 128-139 // En este estudio se evalúan MDE analizando las incertidumbres en el cálculo del gradiente de pendiente y su efecto en los análisis de estimación de pérdida de suelo. Los análisis se llevan a cabo en lugares de bajo relieve con pendientes por debajo del 15%. Los estadísticos comúnmente suministrados para un MDE (RMSE, μ), son referidos a las incertidumbres en altitud y no pueden ser traducidos directamente en incertidumbres de gradiente de pendiente. Los modelos de índices de erosión de laderas (p.e. SWAT, AGNPS y RUSLE) son muy sensibles a la calidad del MDE. Las zonas de estudio se sitúan al este de Australia. Los datos empleados son MDE obtenidos a partir de cartografía topográfica nacional a E50k y E100k, y se emplearon las redes de drenaje de la cartografía para reforzar la dirección de flujo de los MDE obtenidos a partir de esta cartografía. Se generaron dos MDE, con pasos de malla de 20×20 m y 100×100 m, para hacerlos semejantes con los MDE SRTM (30 y 90 m). Estos MDE fueron validados con medidas GPS dando RMSE≈ 2 m. En estudios anteriores se comprobó

que en MDE SRTM el 90% de los pdc considerados están por debajo de un RMSE= 6 m, pdc medidos con técnicas GPS. Los cuatro MDE fueron comparados y contrastados con un MDE obtenido por fotogrametría, pero con un paso de malla de 10×10 m. Las incertidumbres de gradiente de pendiente en MDE SRTM fueron más pequeños y consistentes que los MDE procedentes de cartografía, el MDE SRTM de paso de malla de 30×30 m fue más exacto que el MDE SRTM de paso de malla de 90×90 m. De igual forma el MDE SRTM de paso de malla de 30×30 m dio la estimación de erosión de laderas (índice de RUSLE) más exacto y consistente. Se concluye recomendando el MDE SRTM de paso de malla de 30×30 m para estudios de estimación de erosión en laderas.

137. RUIZ, J.J.; DIAZ-MAS, L.; PÉREZ, F.; VIGURIA, A. (2013). *Evaluating the accuracy of DEM generation algorithms from UAV imagery*. International Archives of the Photogrammetry, Remote and Spatial Information Sciences, vol. XL-1/W2, Rostock, Germany // Los MDE obtenidos mediante UAV han crecido mucho en los últimos años, por su comodidad y rapidez en la captura de información espacial, sobre todo en lo referente a la obtención de MDE. Sin embargo, parámetros como el solapamiento, altitud de vuelo, resolución de la cámara, etc. son factores que afecta a la exactitud del MDE obtenido. Por otra parte, las incertidumbres del GPS, que afectan la posición asociada a cada imagen, tienen gran influencia en la exactitud final del MDE. El objetivo de este trabajo es cuantificar éste último factor, para ello se realizan experimentos en un medio controlado donde se puede disponer de información precisa del UAV. Así, las pruebas se realizan en interior del Centro de Tecnologías Aeroespaciales Avanzadas, de la Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial (FADA), donde se puede conseguir una medida de posicionamiento muy exacta, tal que, posteriormente se puede añadir ruido para simular errores en los receptores GPS que se prueban. Se supone que tanto las imágenes capturas como la planificación de vuelo son realizadas correctamente y no introducen error alguno. Se utiliza una plataforma UAV con cuatro motores. En el experimento se simulaban diferentes clases de correcciones diferenciales GPS usando diferentes modelos de ruido para la simulación de los errores de posicionamiento. Los tipos de recepción de correcciones fueron: RTK, WAAS/EGNOS, DGPS y GPS con la disponibilidad selectiva desactivada, la precisión vertical teórica de cada uno de los métodos de corrección es: 0,3 m, 3 m, 5 m y 15 m. Se generaron cuatro conjuntos de datos diferentes, representando cada uno la información facilitada por los diferentes tipos de GPS. Para comprobar la calidad se seleccionaron 18 pdc repartidos por todo el modelo (escenario recreando un caso real). Los RMSE obtenidos para cada tipo de GPS dieron los siguientes valores: RTK=7,72 mm, WAAS/EGNOS= 5,33 mm, DGPS= 23,52 mm y GPS=79,63 mm. Si se utilizan 5 de los 18 pdc como puntos de apoyo en la obtención del MDE los resultados del RMSE dan los siguientes valores: RTK=3,7 mm, WAAS/EGNOS=3,47 mm, DGPS= 4,16 mm y GPS= 3,73 mm.
138. GIRIBABU, D.; SRINIVASA, R.; KRISHNA MURTHY, Y.V.N. (2013). *Improving Cartosat-1 DEM accuracy using synthetic stereo pair and triplet*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 77, pp. 31-43 // En este trabajo se presenta una variante en el procesado de los estereopares de imágenes obtenidos por Cartosat-1 para la obtención de MDE mejorados, evitando problemas de oclusión que se daban con bastante frecuencia en las escenas de zonas con bastante pendiente (alta montaña).

Se procesan estereopares de imágenes con ángulos de inclinación de $+26^\circ$ y -5° con respecto al nadir, también se procesa el estereopar inverso $+5^\circ$ y -26° y también se realiza el procesamiento de estereopares combinados (-26° y -5° , $+26^\circ$ y $+5^\circ$, $+26^\circ$ y -26° y $+5^\circ$ y -5°). Posteriormente, se comparan los MDE generados en diferentes tipos de terreno (llano-ondulado y de fuertes pendientes). La zona de estudio se sitúa en el Distrito Durg, Estado de Chhattisgarh (India). La extensión de la zona abarca 908.517 Km^2 . Para cada estereopar obtenido se dispone de seis puntos de control obtenidos por técnicas DGPS, finalmente se obtuvieron 6 MDE de paso de malla $10 \times 10 \text{ m}$. Los valores de RMSE obtenidos, en zonas de terreno llano, para los distintos estereopares son: $\text{RMSE}_{+26^\circ/-5^\circ} = 3,13 \text{ m}$; $\text{RMSE}_{+5^\circ/-26^\circ} = 3,09 \text{ m}$; $\text{RMSE}_{-26^\circ/-5^\circ} = 6,45 \text{ m}$; $\text{RMSE}_{+26^\circ/+5^\circ} = 7,74 \text{ m}$; $\text{RMSE}_{-5^\circ/+5^\circ} = 15,33 \text{ m}$; y, $\text{RMSE}_{+26^\circ/-26^\circ} = 2,95 \text{ m}$. Se indica que la razón entre B/H del estereopar es determinante en los resultados de la incertidumbre de cada uno de ellos, de forma que cuando el valor de B/H decrece de 0,5 la incertidumbre del MDE aumenta proporcionalmente también. Los mejores resultados se obtuvieron con valores de B/H entre 0,5 y 1. En zonas de fuerte pendiente y eliminado el estereopar $-5^\circ/+5^\circ$, dada su mala proporción B/H, se obtuvieron los siguientes valores: $\text{RMSE}_{+26^\circ/-5^\circ} = 5,87 \text{ m}$; $\text{RMSE}_{+5^\circ/-26^\circ} = 5,93 \text{ m}$; $\text{RMSE}_{-26^\circ/-5^\circ} = 7,11 \text{ m}$; $\text{RMSE}_{+26^\circ/+5^\circ} = 7,84 \text{ m}$; y $\text{RMSE}_{+26^\circ/-26^\circ} = 12,91 \text{ m}$. A la vista de estos resultados los MDE obtenidos, en visión directa e inversa da unos resultados algo mejores en la obtención de MDE a pesar de los problemas de oclusión que se originan y que dificultan el estéreo-matching. Para resolver el problema se propone el uso de tripletas de estereopares, ya que podemos disponer de distintos puntos de vista de la misma zona. Como conclusión, se puede observar que en zonas llanas u onduladas los MDE mejoran cuando se tienen en cuenta estereopares sintéticos o combinados. En el caso de zonas de fuertes pendientes el MDE basado en tripletas mejora las incertidumbres, se obtienen los mejores valores ($\text{RMSE} = 3,18 \text{ m}$) utilizando la tripleta que considera la tomas $-26^\circ/+5^\circ/+26^\circ$.

139. NOH, M.J.; HOWAT, I.M. (2014). *Automated Coregistration of repeat Digital Elevation Models for Surface elevation change measurement using geometric constraints*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 52, N° 4, pp: 2247-2260 // Existe un gran archivo, de más de diez años, de MDEs disponibles para estudios de procesos sobre la superficie terrestre. En este trabajo se presenta un algoritmo para detectar de forma automática superficies de control en MDE de la misma zona, pero de diferente época. Para ello establece transformaciones 3D conformes y se controla la calidad del MDE para asegurar el corregistro. Se utiliza un procedimiento de emparejamiento con restricciones geométricas que trabaja con pendientes, orientaciones y ondulaciones de altitudes como base de los pesos en un proceso iterativo. El control de calidad se realiza a través de la evaluación de similitudes geométricas, así como por la cantidad de superficie sin cambios. El algoritmo se prueba en las zonas de glaciares de Groenlandia, ya que sufren un cambio rápido. Se usa un MDE ASTER y un MDE SPOT5. Se comparan los MDE antes y después del corregistro, resultando unos valores de RMSE de 8,66 m antes y que se reduce a 3,44 m después, la desviación estándar (σ) de 22,79 m también decrece a 15,26 m. El porcentaje promedio de mejora es de 87% y 24% para la media (μ) y la desviación estándar (σ), respectivamente.
140. AGUILAR, M.A.; SALDAÑA, M.M.; AGUILAR, F.J. (2014). *Generation and quality assessment of stereo-extracted DSM from GeoEye-1 and WorldView-2 imagery*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 52, N°2,

pp:1259-1271 // La relación B/H de cualquier imagen juega un papel importante en la exactitud vertical del MDS. El objetivo es evaluar y comparar los MDS extraídos de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2, en una misma área de trabajo y en las mismas condiciones. Como referencia se emplea un MDS LiDAR. Se evalúa la influencia sobre la incertidumbre vertical del MDS de varios factores (modelo del sensor, número de puntos de apoyo, características radiométricas de cada imagen, tiempo entre fechas de adquisición, ocupación del suelo, geometría de la imagen). El área de estudio se localiza en Garrucha y Villaricos (Almería, España), con una extensión total de 7.71 Km². Se emplean 51 puntos de apoyo obtenidos por técnicas GPS. En total se consideraron 15 estereopares de imágenes. Se consideran varias subáreas, una de suelo desnudo y otra urbana, además del área total. Los modelos LiDAR se triangulan y se compara con los diferentes MDS obtenidos con las imágenes. La evaluación de la incertidumbre vertical de los MDS sobre áreas de suelo desnudo usando diferente número de puntos de apoyo y dos modelos de sensor (RPC0 y CCRS) resultan en una desviación estándar (σ) similar, entre 0,39 a 2,07 m. La incertidumbre vertical en esta área fue siempre menor con el incremento de la ratio B/H. La calidad es muy dependiente de la cubierta siendo mejor en los suelos desnudos y llanos que en las áreas urbanas. En el total de la zona las incertidumbres verticales van desde $\sigma=$ 1,33 m, 2,04 m percentil 90 y 3,16 m percentil 95 a $\sigma=$ 4,29 m, 6,69 m percentil 90 y 10,17 m percentil 95. En áreas urbanas los valores del percentil 90 están entre 5,05 y 7,77 m. La mejor incertidumbre la obtuvo el GeoEye-1. La compleción estaba entre 47,97% y el 83,35%. El factor que más influía era la diferencia de tiempo entre adquisiciones. La compleción más alta la obtuvo el satélite WordView-2.

141. BECEK, K. (2014). *Assessing Global Digital Elevation Models using the Runway Method: The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer versus the Shuttle Radar Topography Mission case*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 52, N° 8, pp: 4823-4831 // Las misiones globales ASTER y SRTM se evalúan utilizando el método de las pistas o carreteras. El método usa perfiles de pistas, caminos o carreteras como datos de referencia, que luego se comparan con los perfiles obtenidos de los MDE globales en las mismas localizaciones. Una comparación cruzada de los dos MDE ha ayudado a subrayar unos hechos importantes: ambos exhiben una diferencia de altitud negativa o sesgo negativo, y el MDE ASTER contiene atípicos que pueden ser detectados y corregidos de forma sencilla, particularmente en terreno llano. Como contraste se emplea para este estudio *The Global Elevation Data Testing Facility*, una utilidad que contiene un total de 8.500 carreteras, pistas, etc. de las que dispone de coordenadas geográficas, altitudes respecto al nivel medio del mar, e identificador de la pista. La incertidumbre posicional de las pistas es mejor de 1 m en planta, en altura la exactitud es de 0,25 m aprox. Se utilizaron un total de 96 caminos o carreteras. Los resultados arrojan que la media del sesgo negativo del ASTER-2 es de 3,59 m para el SRTM es 1,61 m. La desviación estándar es de 7,3 m en el ASTER y 2,2 m en el SRTM, el RMSE en ASTER 2,7 m y en SRTM 1,4 m.
142. CUARTERO, A.; POLO, M.E.; RODRÍGUEZ, P.G.; FELICÍSIMO, A.M.; RUIZ-CUETOS, J.C. (2014). *The use of Spherical Statistics to Analyze Digital Elevation Models: An Example from LiDAR and ASTER GDEM*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Vol. 11, N° 7, pp:1200-1204 // Haciendo uso del software libre

VecStasGraph3D los autores proponen el uso de estadísticos esféricos 3D para comparar y analizar MDE. Comparando puntos homólogos en dos MDE diferentes se generan vectores 3D, los cuales se pueden analizar por estadísticos esféricos. Un vector 3D se define por su módulo (estadístico lineal) y por los valores de colatitud y longitud en la esfera unitaria. VecStatGraphs3D es un paquete de R desarrollado por los autores y que proporciona estadísticos para módulos (lineales), colatitud y longitud (esféricos), y gráficos para el análisis conjunto de vectores 3D. Se trabaja con un MDE LiDAR (5×5 m) y un MDE ASTER GDEM (30×30 m). Los gráficos 3D interactivos revelan patrones espaciales y asisten en la comprensión del efecto del paso de malla del MDE en la incertidumbre. El área de estudio se sitúa en los Picos de Europa, España. Se busca en cada MDE los picos y simas, es decir, los puntos singulares. Posteriormente, cada punto singular en el GDEM es emparejado con su punto homólogo en el MDE LiDAR por medio de un algoritmo automático de proximidad. El resultado es un conjunto de vectores 3D. Se analizan los patrones de desplazamiento, si hay. En total se obtuvieron 1.509 vectores. El desplazamiento medio es de 11,64 m. Los gráficos con los que se representan los estadísticos esféricos (orientación, longitud, etc.) siguen unos patrones muy complejos en general.

143. BERTHIER, E.; VINCENT, C.; MAGNÚSSON, E.; GUNNLAUGSSON, A.; PITTE, P.; LE MEUR, E.; MASIOKAS, M.; RUIZ, L.; PÁLSSON, F.; BELART, J.M.; WAGNON, P. (2014). *Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images*. The Cryosphere, vol. 8, pp. 2275-2291 // El objetivo es cuantificar la pérdida de masa que sufren los glaciares debido al Cambio Climático, para lo que es necesario una topografía exhaustiva de forma periódica. El trabajo evalúa el potencial de las imágenes submétricas del satélite Pléiades para este fin. Se seleccionaron cinco lugares de estudio, localizadas en Islandia, Los Alpes Europeos, los Andes Centrales, Nepal y la Antártida, realizándose mediciones casi simultáneas en todos ellos. En el caso de Islandia, el MDE Pléiades se compara con un MDE LiDAR y se obtiene un sistematismo menor de 1 m usando puntos de apoyo del terreno. Sin el uso de estos puntos de apoyo el sesgo aumenta hasta los 7 m. Independientemente de estos sistemáticos la incertidumbre vertical del MDE Pléiades es de RMSE=1 m e incluso 0,5 m en las zonas llanas de la lengua del glaciar. La incertidumbre es similar en zonas de acumulación de la Antártida. Se demuestra el alto potencial de los MDE de Pléiades para la medida estacional, anual y multianual de los cambios de altitud con una incertidumbre media de en torno a 1 m, o mejor, si las imágenes están libres de nubes. El balance de pérdida de masa del Mont Blanc da un valor de diferencias de altitudes comparando dos MDE, por un lado, el MDE obtenido de SPOT 5, y por otro el de Pléiades, de $\mu = -1,04$ m y $\sigma = 0,23$ m, entre las fechas de 2003 y 2012, respectivamente.
144. ROBINSON, N.; REGETZ, J.; GURALNICK, R.P. (2014). *EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90 m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 87, pp. 57-67 // La existencia de productos de MDE de carácter global y gratuito es un hecho hoy día, aun así, existe una ausencia de producto de alta resolución y calidad comprobada, libre y de consenso global, ya que para la realización de un estudio de ámbito espacial grande se ha de recurrir en muchas ocasiones a distintas fuentes de datos de MDE con calidades y problemáticas diferentes, por ese motivo se impulsó la creación de un nuevo producto de MDE descrito en este trabajo, el

EarthEnv-DEM90. Uno de los productos más controlados cualitativamente es el MDE CGIAR-CSI (*Consortium for Spatial Information of the Consultative Group of International Agricultural Research*), que es resultado de un postproceso derivado de datos MDE SRTM. La versión más reciente es la 4.1, con un paso de malla de 90×90 m. Este MDE cubre hasta la latitud entre los 60° Norte y Sur, para esas regiones el ASTER está disponible, aunque con muchos huecos. Este nuevo MDE es una compilación de un conjunto de datos procedentes de CGIAR-CSI, de ASTER y GLSDEM (NADA & USGS), éste último es una compilación de datos por el *Global Land Cover Facility* (conjunto de datos que se ha empleado generalmente para rellenar huecos de ASTER GDEM 2). Se distinguieron tres zonas, según los datos disponibles en cada una, y se utiliza software open-source (p.ej. GDAL, Quantum GIS, etc.). La unión se realiza por una Mezcla Gausiana, y una vez unidos los MDE se realiza un suavizado, usando una técnica multiescala para eliminar ruido (diferencia de altura de una celda con las vecinas, que supera unos umbrales aceptables). El MDE resultante alcanza hasta los 83° de latitud, ya que los modelos disponibles en latitudes mayores tienen excesivos huecos. Finalmente se realiza una evaluación de la calidad, con respecto a datos altimétricos de la *Global Elevation Data Testing Facility*. En las zonas de ASTER se seleccionaron un total de 182 pdc, dos por pista o carretera, en total 91 pistas, en la zona de CGIAR-CSI se obtuvieron un total de 484 pdc (242 aeropuertos), y en zonas de mezcla de ambos modelos un total de 78 pdc. En la zona de ASTER el nuevo MDE tuvo unas diferencias de $\mu = 6,2$ m de altitud inferior a la de los pdc. En la zona de CGIAR-CSI el nuevo modelo tuvo unas diferencias de altitud de $\mu = 1,64$ m también más bajo que los pdc.

145. ASPRS (2014). *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. Edition 1, Version 1.0, November 2014. // Este estándar ha sido desarrollado por el *ASPRS Map Accuracy Standards Working Group*. Reemplaza al *ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps* (1990) (Ver referencia 3) y a *ASPRS Guidelines, Vertical Accuracy Reporting for LiDAR Data* (2004) (Ver referencia 59). Define las clases específicas de incertidumbre y los umbrales asociados al valor de RMSE para ortoimágenes digitales, datos planimétricos digitales y datos de altitud digital. También incluye medidas de incertidumbre para parámetros adicionales como: líneas de unión de las ortoimágenes, incertidumbre de los puntos de apoyo del terreno, incertidumbre de la aerotriangulación, densidad mínima de pulso LiDAR recomendado, incertidumbre horizontal de los datos altimétricos, delimitación de las áreas de baja confianza en datos altimétricos y distribución espacial y número de puntos de control sobre el área de proyecto. En el estándar no se especifican en ningún momento las prácticas o metodologías necesarias para cumplir con los umbrales de incertidumbre establecidos en él. La incertidumbre horizontal se evalúa por los estadísticos de $RMSE_x$, $RMSE_y$ y $RMSE_r$, en la incertidumbre vertical sólo se evalúa el $RMSE_z$. Para la incertidumbre vertical se usan diferentes métodos según se trata de terreno sin vegetación o con vegetación, ya que los errores en el primer caso pueden seguir una distribución normal, no siendo así en el caso de la existencia de vegetación (teniendo en cuenta las técnicas actuales de captación del dato). Cuando los errores no siguen una distribución normal el valor del percentil 95 es propuesto para estimar la incertidumbre a un nivel de confianza del 95%. Por ese motivo la incertidumbre vertical se evalúa por $1,96 \times RMSE_z$ en terreno sin vegetación. También se establece

que el conjunto de datos de altitud debe ser evaluado de la incertidumbre horizontal donde sea posible. En el caso de terreno sin vegetación los estimadores correspondientes al valor del 95% del nivel de confianza se calculan usando el NSSDA (ver referencia 35). El estándar especifica el umbral de incertidumbre horizontal para dos tipos de datos de altitud digital con diferentes exigencias de incertidumbre horizontal: 1) Datos de altitud fotogramétricos, siendo la incertidumbre horizontal la que se exigiría en productos cartográficos 2D que facilitara ésta misma fuente de datos; 2) Datos de altitud LiDAR, la incertidumbre horizontal es en gran parte una función de la incertidumbre posicional derivada del GNSS, del IMU (*Inertial Measurement Unit*), altitud de vuelo y orientación.

146. MÜLER, J.; GÄRTNER-ROER, I.; THEE, P.; GINZLER, C. (2014). *Accuracy assessment of airborne photogrammetrically derived high-resolution digital elevation models in a high mountain environment*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 98, pp. 58-69 // Se pretende determinar la incertidumbre absoluta de los MDE generados por estereocámaras aéreas de alta resolución (HRSC-A), los sensores digitales aéreos Leica (ADS40 y ADS80) y el sistema de cámara analógica RC30. La zona de estudio se sitúa en el Valle de Turtmann, Valais (Suiza), un glacial y periglacial formado en un valle inclinado entre los 2.400 y 3.300 m de altitud. Los MDE derivados fotogramétricamente se evalúa contrastando con datos de mediciones geodésicas y de ALS. La distribución de las incertidumbres muestran una tendencia no Gausiana. En el caso de los sensores ADS40 y ADS80 (ambos con un MDE de paso de malla de 0.5×0.5 m) generan el MDE más exacto en terreno de alta montaña con un RMSE= 0,8 m, obteniendo también la mejor incertidumbre relativa a la altura de vuelo 0,14 %. El sistema HRSC-A produce un RMSE= 1,03 m (el MDE tiene 10 veces más espaciado de malla que el anterior), su incertidumbre de altura de vuelo está en 0,21%. La cámara analógica RC30 genera MDE con dos veces la resolución espacial de los sensores de Leica, con un RMSE=1,3 m y una incertidumbre en la altitud de vuelo de 0,17%. Se observa una correlación entre la pendiente y el valor del RMSE, a mayor pendiente del terreno aumenta el valor del RMSE y por tanto se produce un empeoramiento en la incertidumbre del MDE..
147. YANG, P.; AMES, D.P.; FONSECA, A.; ANDERSON, D.; SHRESTHA, R.; GLENN, N.F.; CAO, Y. (2014). *What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results?* Environmental Modelling & Software, vol. 58. pp.48-57 // Se examina el efecto del paso de malla en MDE LiDAR, con el fin de extraer características hidrográficas y realizar modelado hidrológico. Se seleccionaron tres cuencas, situadas en Idaho, USA. Los MDE fueron evaluados utilizando los límites de las cuencas y la red de drenaje de referencia, ambos datos se obtuvieron por medidas directas en campo, corregidas y ajustadas a partir de información disponible de las tres cuencas (p.ej. imágenes de 1×1 m de paso de malla del *National Agriculture Imagery Program*). Para la extracción del límite de la cuenca, así como la red de drenaje se utilizó el software ArcGIS 9.3. Se evaluaron MDE de los siguientes pasos de malla: 1×1 m, 5×5 m, 10×10 m, 30×30 m y 50×50 m. Los resultados muestran que el MDE LiDAR de paso de malla 1×1 m produce características hidrográficas más detalladas. El RMSE en la longitud de la red de drenaje aumenta con el aumento del paso de malla. Se observa también que la desviación absoluta entre la sinuosidad de una muestra de los canales y los datos de referencia alcanza su valor más bajo en el paso de malla de 10×10 m. Esto demuestra que los resultados de los canales del LiDAR se emparejan

mejor con los de referencia a un paso de malla intermedio y no a un paso de malla muy bajo. El modelado de simulación de flujo diario y mensual, mostró un alto acuerdo entre lo observado y los valores simulados. Concluye que los MDE LiDAR de bajo paso de malla mejoran la red de canales y la representación de los límites de cuenca, pero también se determina que la mejora en hidrografía no necesariamente resulta en una mejora de la simulación de flujos usando un modelo hidrológico a la escala de la cuenca. Esto puede optimizar el coste económico a la hora de tomar datos para el análisis de una cuenca determinada.

148. MASHIMBYE, Z.E.; DE CLERCQ, W.P.; VAN NIEKERK, A. (2014). *An evaluation of digital elevation models (DEMs) for delineating land components*. Geoderma, vol. 213, pp. 312-319 // Trata de delinear unidades morfológicas del terreno a partir de MDE. El artículo se centra en comparar las unidades morfológicas derivadas de cinco MDE, concretamente del ASTER GDEM-2 (30×30 m), el SRTM (90×90 m), dos versiones del SUDEM L1 y L2 (Stellenbosch University DEMs, de 5×5 m) y el GEOEYE DEM (5×5 m). Los MDE SRTM y ASTER se remuestrearon a 5 m. La zona de estudio se sitúa en la cuenca de Sandspruit en el Rio Berg, Sudáfrica, con una extensión de 152 km². Las unidades morfológicas se extrajeron utilizando el algoritmo MRS, implementado en el software eCognition 8.6, el gradiente de pendiente y la orientación se usaron como capas de entrada a MRS para la detección de límites de las unidades morfológicas. Los resultados de la determinación de las unidades morfológicas fueron inspeccionados visualmente, lo que consiste en observar los posibles saltos en la determinación de las unidades morfológicas del terreno y la forma del terreno representado; y cuantitativamente evaluando la homogeneidad interna de las unidades mediante el cálculo de la desviación estándar del gradiente de pendiente, un pequeño valor de la desviación significa una alta homogeneidad interna. Un tercer método de evaluación fue el cálculo de la varianza local del gradiente de pendiente, el valor de la varianza debería ser mínimo en el interior de las unidades morfológicas delineadas y máximo en sus límites. En la inspección visual el MDE GEOEYE da el mejor resultado al identificar las discontinuidades morfológicas. También el MDE GEOEYE da un valor medio más bajo para la desviación estándar del gradiente de pendiente (1,2) frente al MDE ASTER que arroja el mayor valor (4,4), sin embargo, el MDE SRTM da un valor idéntico al del MDE GEOEYE. Según los autores esto está motivado por su mayor paso de malla (90 m), que provoca un mayor suavizado del terreno. En cuanto a la proporción establecida entre la varianza local de la pendiente interna y en los bordes, da valores siempre mayores de 1, lo cual indica que la homogeneidad interna es máxima, especialmente el valor más alto lo da el MDE GEOEYE y el MDE SUDEM L2 (1,5) frente al MDE SUDEM L1 (1,0), los MDE SRTM y ASTER (1,3). La conclusión es que las propiedades de cada MDE influyen muy directamente en los resultados obtenidos con esta metodología de evaluación de unidades morfológicas.
149. OUÉDRAOGO, M.M.; DEGRÉ, A.; DEBOUCHE, C.; LISEIN, J. (2014). *The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds*. Geomorphology, vol. 214, pp. 339-355 // Para la evaluación de la pérdida de suelo, originado por el uso agrícola intensivo al que se someten determinadas zonas, en función del tipo de cultivo, residuos del cultivo, etc., se deben estudiar los cambios microtopográficos originados

en el terreno a lo largo de un intervalo de tiempo. Para este fin es necesario disponer de MDE de alta resolución de las zonas en cuestión. En este estudio se estudia la idoneidad del láser escáner terrestre y por otro lado el uso de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV). Con ellos se pueden generar MDE de alta resolución espacial, paso de malla de 1×1 m. La zona de estudio se sitúa en Wallonia (Bélgica), con una extensión de 12 Ha. Para la evaluación de los MDE creados a partir de los láser escáner y de Fotogrametría, se tomaron 1.098 pdc usando RTK-GPS. El resultado final muestra que los MDE obtenidos por láser escáner fueron más exactos (RMSE=4,5 cm) que los MDE obtenidos por fotogrametría (RMSE=9.0 cm y RMSE=13,9 cm), utilizando dos paquetes diferentes de software para el procesado Agisoft Photoscan y MicMac.

150. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. (2014). *EU-DEM Statistical Validation Report*. Programa Copernicus. Report European Environment Agency // El EU-DEM es un MDE que viene a satisfacer la necesidad de disponer de un MDE con una resolución de 30×30 m que cubra todo el continente europeo, y una exactitud de ± 7 m, aunque los requerimientos iniciales eran de ± 5 m para terrenos montañosos ($>30\%$ de pendiente), ± 2 m para terrenos ondulados (entre un 10% y un 30% de pendiente) y ± 1 m para terrenos llanos ($<10\%$ de pendiente). Se ha obtenido partiendo de diferentes fuentes de datos, por un lado, los MDE globales SRTM y ASTER GDEM, y por otro lado, de cartografía topográfica rusa. La validación de la exactitud vertical del EU-DEM es necesaria para demostrar que se encuentra dentro de las especificaciones iniciales. El área total cubierta por el EU-DEM es de 5,84 Millones de Km^2 , en un total de 39 países. Para la validación del MDE se usaron datos de ICESat, se calculó la exactitud fundamental utilizando datos en zonas llanas y desnudas, sin vegetación, la exactitud suplementaria o consolidada utilizando zonas cubiertas de vegetación. La exactitud no se expresa solamente como valor único para todo el EU-DEM, sino que también se facilita por países, de esta forma podemos observar potenciales sesgos regionales. Se utilizaron en torno a 900.000 pdc de ICESat. La exactitud fundamental determinada en zonas de pendiente inferior al 10% y suelo desnudo, sin vegetación, tiene un valor de RMSE $< \pm 5,69$ m al 95% del nivel de confianza, exceptuando a Islandia (RMSE= $\pm 9,41$ m), Noruega (RMSE= $\pm 5,75$ m) y Suecia (RMSE= $\pm 7,41$ m). Se analizan las exactitudes fundamentales por encima del paralelo 60°N y por debajo de forma separada, al disponer de datos SRTM y ASTER por debajo de ese paralelo, y por encima sólo de datos ASTER y cartografía topográfica rusa, se obtiene un RMSE= $\pm 4,37$ m al 95% del nivel de confianza, por debajo del paralelo 60°N , y RMSE= $\pm 10,18$ m al 95% del nivel de confianza, más al norte del paralelo 60°N . La exactitud suplementaria (combinando zonas de mayor pendiente y con vegetación) muestra valores de RMSE superiores a los anteriores (entre ± 8 m y ± 11 m). En zonas de suelo urbano, se extrajeron 46.000 pdc de ICESat, obteniendo una exactitud suplementaria de RMSE= $\pm 4,87$ m, al 95% del nivel de confianza. Concluye diciendo que los errores aumentan con la pendiente del terreno evaluado, también con la presencia de arbolado y vegetación en general, y finalmente que los RMSE en zonas urbanas no son elevados debido a la mejor calidad de los datos SRTM y ASTER en este tipo de zonas.
151. WITT, E.C. (2015). *Evaluation of the U.S. Geological Survey standard elevation products in a two-dimensional hydraulic modeling application for a low relief coastal floodplain*. Journal of Hydrology, vol. 531, pp. 759-767 // El uso cada vez mayor de

modelos hidráulicos en dos dimensiones ha creado la necesidad de datos de alta resolución para realizar una estimación del volumen de inundación. La zona de estudio se sitúa en Greenville, Carolina del Norte (USA), caracterizándose por una topografía de bajo relieve. Los productos altimétricos usados están públicamente disponibles, siendo los siguientes: 1) datos del *The National Map from 3D Elevation Program* (3DEP, programa nacional de recopilación de datos altimétricos de alta resolución generados por tecnología LiDAR e InSAR). En este caso se empleó un MDE LiDAR con 1×1 m de paso de malla; 2) productos estándar que incluyen los MDE del USGS de 3×3, 10×10 y 30×30 m de paso de malla. Para el modelado hidrológico se emplea el modelo FLO-2D, que simula la velocidad y profundidad del agua. La conclusión final es que los resultados obtenidos utilizando el MDE 3DEP en zonas de explanación costeras y con relieve bajo, resuelven mejor las altitudes, sobre todo en zonas pantanosas y de bosque, consiguiéndose simulaciones que casan muy bien con los datos históricos de inundación.

152. HAYATI, N.; KURNIAWAN, A.; TAUFIK, M. (2015). *Radar Interferometry for Digital Elevation Model in Mount Bromo, Indonesia*. Journal of Geodesy and Geomatics. Geoid, vol. 10, pp. 222-226 // Se usan dos escenas de imágenes SAR para generar un MDE. Se asume que no hay efecto de deformación por motivo de los dos momentos de adquisición. Se deriva la información altimétrica usando la diferencia de fase combinando dos imágenes de diferentes perspectivas. Se utiliza el método de interferometría de dos pasos, si bien, generalmente se emplea el procedimiento de cuatro pasos para la generación de MDE (preprocesado de los datos brutos, procesado interferométrico, desenrollamiento de la fase y conversión de altitudes). A continuación, se realizaron los interferogramas, desenrollamiento de la fase y geocodificación. La zona de estudio está localizada en la montaña Bromo, Indonesia. El MDE radar tiene un paso de malla de 15×15 m. La superficie de la montaña Bromo está cubierta de arena y ceniza volcánica que puede introducir ruido por retrodispersión de la señal. Los MDE InSAR se compararon con los MDE SRTM de 90 m de paso de malla, observando un comportamiento similar entre ambos, aunque de mayor resolución en el caso de InSAR, básicamente por el paso de malla. Los resultados de la comparación fueron de un valor máximo de diferencia de altitudes entre modelos de 25,94 m en la zona de mayor pendiente y $\mu = 5,85$ m. Se concluye que InSAR es una técnica prometedora para la elaboración de MDE con un alto nivel de detalle.
153. PIPAUD, I.; LOIBL, D.; LEHMKUHL, F. (2015). *Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments-A case study from SE Tibet, China*. Geomorphology, vol. 246, pp. 232-254 // Los MDE TanDEM-X ofrecen un gran conjunto de datos a nivel global con la ventaja de aplicar tecnología radar (banda X), que permite generar interferometría radar en una sola pasada. El paso de malla del MDE TanDEM-X es de 12×12 m y tiene menos propensión a los errores atípicos y huecos de datos que los MDE ASTER y MDE SRTM, que podrían ser considerados como una alternativa para los estudios geomorfológicos. En este estudio se presenta el procesado de un MDE a partir de una escena individual del TanDEM-X CoSSC (producto intermedio del Procesador Integrado TanDEM que genera el MDE), cubriendo una zona del sureste del Tibet y se lleva a cabo una comparativa entre MDE procedentes de tres fuentes: TanDEM-X, ASTER (30×30 m) y SRTM (30×30 m). La evaluación de los modelos se lleva a cabo

mediante un análisis cualitativo y visual y un análisis cuantitativo sobre los parámetros geomorfológicos. De forma cualitativa se realizan representaciones del relieve de forma sombreada, observando el mayor detalle del TanDEM-X con respecto a los otros dos, sobre todo en las laderas que están orientadas hacia el sensor, siendo el detalle algo más confuso en laderas opuestas al sensor. En el análisis cuantitativo el MDE TanDEM-X presenta un sesgo negativo con respecto a los otros dos modelos en las dos zonas consideradas: en el valle el sesgo varía entre -22,7 a 65,3 m y en la zona de alta montaña el sesgo alcanza valores de -114,1 m. En cuanto al análisis cuantitativo, para los tres MDE se calculan: ángulo de inclinación medio (en cuatro subzonas seleccionadas dentro del área de estudio), curvatura, vector de rugosidad, etc. Se observa el mayor detalle en todos los parámetros derivados de MDE TanDEM-X, ya que en los modelos MDE ASTER y MDE SRTM la superficie topográfica siempre está más suavizada. Concluye que este MDE es una alternativa para estudios geomorfológicos en zonas de alta montaña donde no existen datos suficientemente detallados para estos fines. Por otra parte, las incertidumbres observadas en el MDE TanDEM-X se atribuyen a ciertas propiedades de la base de datos CoSSC que causa problemas en diferentes pasos del procesamiento del modelo: parada que provoca pérdida de información topográfica en zonas de fuerte pendiente de laderas que están orientadas hacia el sensor, baja señal para cálculo del ruido en laderas ocultas al sensor, efectos de descorrelación sobre cuerpos de agua y problemas para el desenvolvimiento de fase en configuraciones de fuerte contraste topográfico. También concluye que el MDE DTED/HRTI-3 tendrá mejores propiedades geométricas y menos propensión a errores aún, siendo un MDE global con alto potencial y relevancia para investigaciones geomorfológicas.

154. WATSON, C.S.; CARRIVICK, J.; QUINCEY, D. (2015). *An improved method to represent DEM uncertainty in glacial lake outburst flood propagation using stochastic simulations*. Journal of Hydrology, vol 529, pp. 1373-1389 // Se modelan las inundaciones repentinas de los lagos glaciares que están afectadas por un conjunto de incertidumbres de valores elevados y frecuentemente estocásticos. Una de las incertidumbres del modelado de esas inundaciones es el provocado por el MDE empleado. Se propone un nuevo método de modelado que le llama MC-LCP (Monte Carlo Least Cost Path). El análisis pretende poner de manifiesto el efecto de la incertidumbre del MDE sobre los parámetros de inundación y sobre la predicción del impacto socio-económico. Para la puesta en práctica del método se emplearon tres MDE: 1) ASTER GDEM v.2 con una malla de 30×30 m y un RMSE teórico vertical de 15,1 m sobre terreno montañoso; 2) SRTM DEM 4.1 con una malla de 90×90 m y un RMSE teórico vertical de 16 m, y 3) un MDE fue generado usando estéreo imágenes ALOS PRISM y puntos de control terreno obtenidos a partir de Google Earth, con malla de 15×15 m. Los resultados de los distintos modelajes de inundación daban valores muy estables independientemente del MDE empleado, sin embargo, con el MDE SRTM se conseguían unos parámetros de inundación más consistentes.
155. UYSAL, M.; TOPRAK, A.S.; POLAT, N. (2015). *DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill*. Measurement, vol. 73, pp. 539-543 // Trata de poner de manifiesto el potencial de rendimiento de las cámaras integradas en un UAV para la generación de MDE en zonas de poca extensión. La zona de estudio tiene una extensión de unas 5 Ha, se tomaron unas 200 fotografías y se utilizaron 27 puntos de control terreno para la georreferenciación de los modelos.

Se generaron un total de 26 millones de puntos georreferenciados para la generación del MDE, la evaluación de la calidad se llevó a cabo con el empleo de 30 pdc, siendo obtenidos por metodología RTK-GPS. El RMSE es de 6,62 cm, con una incertidumbre absoluta en alturas, con un máximo de 8,55 cm y mínimo de 0,81 cm. Finalmente se concluye que el uso de fotogrametría con UAV tiene numerosas ventajas (bajo coste, tiempo de procesado, y mínimo trabajo de campo) en comparación con métodos de topografía clásica, obteniendo una incertidumbre final bastante parecida.

156. AVTAR, R.; YUNUS, A.P.; KRAINES, S.; YAMAMURO, M. (2015). *Evaluation of DEM generation based on Interferometric SAR using TanDEM-X data in Tokyo*. Physics and Chemistry of the Earth, vol. 83-84, pp. 166-177 // El objetivo es evaluar la calidad de los MDE generados para la zona de Tokyo (Japón), obtenidos a partir de datos recogidos del satélite TerraSAR y su satélite gemelo (TanDEM-X), para la obtención de datos de elevación digitales (misión que recibe también el nombre de TanDEM-X). En la misión TanDEM-X se utiliza interferometría SAR para generar un MDE a nivel global de forma consistente. Para que el MDE sea consistente es necesario evaluar la exactitud del MDE en diferentes puntos de planeta. En este trabajo se evalúa un MDE TanDEM-X, con un paso de malla de 5×5 m, en la región de Tokyo, para ello se compara con otros MDE globales (SRTM DEM 90×90 m de paso de malla, y ASTER GDEM de 30×30 m de paso de malla), el GSI DEM, con 10×10 m de paso de malla, generado por las Autoridades Geoespaciales Japonesas y un MDE LiDAR independiente, con un paso de malla de 2×2 m. La zona total de estudio tiene unos 58 km². Tomando como referencia el MDE LiDAR, se extrajeron de él 300 pdc de forma aleatoria, y se remuestrearon todos los MDE a una malla de 10×10 m. Para la determinación de la altitud en cada MDE, de esos 300 pdc se usó el software ArcGIS. Los resultados son: $RMSE_{TanDEM-X} = 3,20$ m, $RMSE_{GSI\ DEM} = 2,44$ m, $RMSE_{SRTM\ DEM} = 7,00$ m y $RMSE_{ASTER\ GDE} = 10,24$ m. También se compararon los resultados de TanDEM-X en diferentes tipos de cubierta del suelo, de forma que la incertidumbre absoluta de TanDEM-X es mayor para áreas urbanas y vegetales, al igual que los modelos globales, puede ser debido a que la señal empleada en TanDEM-X utiliza la primera reflexión de la superficie terrestre que se encuentra, la cual es, generalmente, la parte superior de los edificios o de los cultivos. Se realizaron comparaciones pixel a pixel entre los MDE GSI DEM, TanDEM-X, ASTER y SRTM con respecto al MDE LiDAR con el fin de obtener el nivel de acuerdo entre modelos en términos de regresión y correlación, los resultados fueron: $R_{GSI\ DEM}^2 = 0,9518$; $R_{TanDEM-X}^2 = 0,9425$; $R_{SRTM\ DEM}^2 = 0,8632$ y $R_{ASTER\ GDEM}^2 = 0,8073$. Como estadísticos para expresar la calidad de los MDE además del RMSE también se empleó la incertidumbre absoluta lineal al 95% y al 90% del nivel de confianza.
157. LEONG TAN, M.; FICKLIN, D.L.; DIXON, B.; IBRAHIM, A.L.; YUSOP, Z.; CHAPLOT, V. (2015). *Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow*. Applied Geography, vol. 63, pp. 357-368 // Evalúa la influencia de varios parámetros de un MDE sobre el resultado obtenido con la aplicación del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simulación de corrientes de agua sobre la superficie topográfica. Se trabaja con tres elementos de los MDE: la resolución espacial, la fuente de datos y la técnica de remuestreo empleada. La zona de estudio se sitúa en la cuenca del río Johor (Malaysia), con una extensión de 1.652 Km². Para establecer un modelo SWAT de comparación se consideró un

MDE con un paso de malla de 20×20 m, obtenido a partir de cartografía topográfica con equidistancia de 20 m entre curvas de nivel. Se emplearon cuatro MDE globales: ASTER GDEM2, SRTM v4.1, EarthEnv-DEM90 y GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010). Para evaluar la exactitud de cada MDE se utilizaron 200 pdc obtenidos a partir de cartografía topográfica, los resultados obtenidos son $RMSE_{\text{ASTER-GDEM2}}=16,95$ m y $\mu_{\text{ASTER-GDEM2}}=-7,77$ m; $RMSE_{\text{SRTM-v4.1}}=11,16$ m y $\mu_{\text{SRTM-v4.1}}=-2,07$ m; $RMSE_{\text{EarthEnv-DEM90}}=12,4$ m y $\mu_{\text{EarthEnv-DEM90}}=-3,48$ m.; $RMSE_{\text{GMTED2010}}=16,15$ m y $\mu_{\text{GMTED2010}}=-2,96$ m. Para el contraste del resultado del modelo SWAT utiliza el coeficiente de determinación (R^2) (obtenido de la comparación de las líneas de flujo de corriente de agua) y el coeficiente Nash-Sutcliffe⁶ (NSE), se observa que variando el paso de malla de los MDE los resultados son muy parecidos en todos los casos variando R^2 entre 0,57 y 0,66, esto es justificado por la extensión de la zona, ya que aumentar la resolución espacial del MDE puede tener más impacto en cuencas más pequeñas en extensión ya que se representarían con más detalle determinadas canales de agua, sin embargo cuando la cuenca es muy extensa afecta poco a la determinación de los canales. Sin embargo, el modelo SWAT resulta más sensible tanto a la fuente de los datos como al método de remuestreo, el MDE ASTER GDEM2 mostró los mejores resultados del coeficiente NSE=0,56, seguido por SRTM (0,54), EarthEnv-DEM90 (0,54) y GMTED2010 (0,53). Los mejores valores del coeficiente NSE se obtuvieron con la técnica de remuestreo valor mayoritario, seguido por vecino más próximo, interpolación bilineal y convolución cúbica.

158. WANG, B.; SHI, W.; LIU, E. (2015). *Robust methods for assessing the accuracy of linear interpolated DEM*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 34, pp. 198-206 // Se proponen métodos robustos para la evaluación de la exactitud de un MDE frente al tradicional uso del RMSE. Se consideran tres estadísticos de incertidumbre promedio: un método basado en la distribución t , y otros dos basados principalmente sobre métodos de estadística robusta (estimador de la mediana de Maritz-Jarrett y estimador-M). Los métodos robustos poseen la capacidad de contrarrestar los efectos de atípicos, e incluso los residuos distribuidos por sesgo. Los errores atípicos son actualmente más frecuentes en MDE, ya que muchos de estos MDE proceden de LiDAR que es una tecnología propensa a la aparición de estos valores. La zona de estudio se sitúa en Shannxi (China). Se seleccionaron 5 subzonas de diferentes morfologías de terreno y todas con una extensión de 960 km^2 : Zona A terreno llano; Zona B terreno de transición entre llano y montañoso; Zona C terreno montañoso; Zona D terreno de media montaña; Zona E terreno de alta montaña. Los MDE empleados pertenecen al ASTER GDEM (30×30 m de paso de malla), siendo la incertidumbre vertical estimada de 20 m al 95% del nivel de confianza. El procedimiento de trabajo es: escoger en cada modelo una nube de puntos aleatoriamente distribuidos por la zona (2^{13} puntos), generar con esta selección un MDE con el mismo paso de malla que el original y usando el método de interpolación bilineal y, finalmente, realizar una comparación entre ambos MDE a partir de 10^6 valores de diferencias de altitud. Se demuestra por medio de los valores de sesgo, curtosis y el estadístico de Kolmogorov Smirnov, que la distribución de los residuos de altitud no se ajusta a una distribución normal por la presencia de atípicos

⁶ Ver https://en.wikipedia.org/wiki/Nash%E2%80%93Sutcliffe_model_efficiency_coefficient para más información sobre este coeficiente de eficiencia en el ajuste de modelos hidrológicos.

en los datos. Los resultados, considerando el cuadrado de los residuos con los tres estadísticos propuestos, es que los dos estadísticos robustos son los que tienen la mejor capacidad para contrarrestar el efecto de los atípicos ya que proveen los menores valores. P.ej. en la zona A el MSE= 15,9008, Mediana = 1,6827, y estimador-M=2,3758. Además de concluir con la mejor descripción de la evaluación de la incertidumbre de un MDE mediante medidas de estadística robusta, también concluye que la incertidumbre final de un MDE debería ser considerada como una variable espacial relativa a las características morfométricas del relieve (existe cierta autocorrelación espacial en esta variable, por tanto la muestra de residuos del MDE no son mutuamente independientes), otra conclusión es que establece 400 pdc como requisito mínimo para obtener unos intervalos fiables de la evaluación de la calidad de un MDE, cuando la población de los residuos al cuadrado no sigue una distribución normal debido a la presencia de atípicos.

159. PILLOT, B.; MUSELLI, M.; POGGI, P.; HAURANT, P.; DIAS, J.B. (2016). *Development and validation of a new efficient SRTM DEM-based horizon model combined with optimization and error prediction methods*. Solar Energy, vol. 129, pp. 101-115 // Una de las principales aplicaciones de los MDE es el análisis de la radiación solar para un territorio determinado. Se pretende determinar el horizonte obstruido para cada punto del MDE de una región dada, así como sus efectos en el sombreado. El objetivo es el desarrollo de un modelo de horizonte basado en el MDE SRTM. Este modelo de radiación se deriva de los enunciados matemáticos sin ninguna clase de aproximación empírica. La validación del modelo propuesto se ha realizado contrastándolo con observaciones *in situ* del horizonte y algún otro modelo anterior. El modelo propuesto es siempre más exacto considerando las diferencias angulares del plano de horizonte (RMSE de 1,555° frente a 1,712° de otros modelos), y es 4 veces más rápido. Finalmente, utilizando datos *in situ*, se ha desarrollado un método para predecir la repercusión de la incertidumbre del MDE SRTM original en la determinación del horizonte final. Dejando a un lado las incertidumbres de medida (ángulo de horizonte, coordenadas geográficas del punto de observación) se considera relacionar la incertidumbre de horizonte con la incertidumbre en altitudes del MDE. Para el desarrollo del estudio sólo consideran la incertidumbre vertical, por ser al más fácil de implementar y el factor principal en la incertidumbre del ángulo de elevación del horizonte. La idea es que si se puede predecir la incertidumbre vertical del MDE se puede evaluar la incertidumbre angular del plano de horizonte. El desarrollo es una derivación matemática de la propagación de incertidumbres desde la altitud hasta la obtención del valor del ángulo de inclinación sobre el horizonte, obteniendo una incertidumbre en el ángulo de inclinación del horizonte en función de la incertidumbre de altitud del propio MDE.
160. PATEL, A.; KATIYAR, S.K.; PRASAD, V. (2016). *Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS)*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, vol. 19, Issue 1, pp. 7-16 // Los MDE considerados *Open Source* tales como DEM ASTER, DEM SRTM o DEM Cartosat-1, vienen afectados por incertidumbres durante la recogida de información y sesgos que dependen de las condiciones del terreno. Se realiza la evaluación de la calidad de MDE usando pdc obtenidos con GPS. Primero las altitudes contenidas en los MDE se convirtieron en curvas de nivel, mediante una interpolación lineal, con una

equidistancia de 1 m. Posteriormente se seleccionó una muestra aleatoria de puntos sobre las curvas de nivel que sirvió para la elaboración de una superficie, interpolando mediante varias técnicas, tales como: ponderación inversa a la distancia, interpolación de polinomio global (GPI), Kriging, interpolación de polinomio local (LPI), interpolación bilineal y función de base radial (RBF). La evaluación se ha desarrollado utilizando 830 pdc en la zona (Madhya, India, con una extensión total de 120 Km²). El análisis de las diferencias entre altitudes, comparando con los pdc, nos muestra los siguientes resultados: utilizando el método de interpolación bilineal, en el caso de Cartosat-1 y SRTM, se ha reducido mucho los valores de RMSE y error medio (μ), en el caso de SRTM el RMSE=2,73 m y el μ =-0.36 m, en el caso de Cartosat-1 el RMSE=3,36 m. y el μ =-2.74 m, sin embargo, en el caso de ASTER la reducción de incertidumbres, con interpolación bilineal, no es tan notable, ya que se mantienen los μ en valores muy similares para todos los métodos de interpolación, en el caso bilineal el RMSE= 6,12 m y el μ = 0,28 m, el valor más bajo de μ lo da en el método de interpolación de Kriging, donde μ = 0,22 m. También se compararon los MDE con los pdc sin utilizar métodos de interpolación, el resultado fue favorable a Cartosat-1, los resultados dieron los siguientes valores: RMSE= 3,49 m y μ = -2,71 m, siendo los valores más bajos de los tres MDE considerados.

161. O'LOUGHLIN, F.E.; PAIVA, R.C.D.; DURAND, M.; ALSDORF, D.E.; BATES, P.D. (2016). *A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product*. Remote Sensing of Environment, vol. 182, pp. 49-59 // Trata de la producción de un MDE global corregido de los efectos de la vegetación. Para ello combina datos de varias fuentes, por un lado, parte del SRTM DEM, añade y combina puntos medidos con altímetro laser de ICESat y una base de datos del porcentaje de cubierta vegetal a partir del satélite MODIS como datos para obtener las altitudes de la vegetación a nivel global con el que eliminar su efecto sobre los datos SRTM DEM originales. El producto final presenta mejoras mayores de 10 m en el sesgo sobre el original en zonas de vegetación alta. El contraste para evaluación de la exactitud resultante se realizó con los datos de ICESat, que tienen una incertidumbre de $0,01 \pm 0,04$ m en superficies llanas. Aproximadamente se manejaron un total de 200.000.000 de pdc, resultando un RMSE=5,9 m y μ = 0,29 m. Se testearon cinco funciones diferentes de corrección de la vegetación, desde un modelo lineal simple a funciones exponenciales, siendo el mejor modelo el de potencia 1.
162. CHEN, C.; LIU, F.; LI, Y.; YAN, C.; LIU, G. (2016). *A robust interpolation method for constructing digital elevation models from remote sensing data*. Geomorphology, vol. 268, pp. 275-287 // Estudio basado en la teoría de que los MDE procedentes de fuentes de Teledetección contienen muchos valores atípicos debido a varios factores, tales como la limitación física del sensor y el bajo contraste de las texturas del terreno. Con el fin de reducir los efectos de esos valores atípicos en la construcción del MDE se propone un algoritmo robusto basado en metodología de interpolación multicuadrática (MQ) sobre estimadores-M (MQ-M). MQ-M adopta una función de ponderación adaptativa en tres partes: La función de ponderación es nula para grandes errores, uno para pequeños errores y cuadrática para otros. Se empleó una superficie matemática para analizar la robustez de MQ-M, comparándola con la interpolación clásica MQ y el método robusto desarrollado recientemente basado en la mínima desviación absoluta (MQ-L). Los tests numéricos (basados en el cálculo de RMSE) muestran que MQ-M es mejor que los otros dos métodos clásicos cuando la muestra

de puntos sigue una distribución normal o de Laplace. Cuando aparecen valores atípicos el método de interpolación (MQ) se comporta mejor que el segundo (MQ-L). Los valores de RMSE para cada método de interpolación MQ-M, MQ-L y MQ van en un rango de 0,0255 a 0,0384, 0,0446 a 0,0723 y 0,1251 a 0,1729, respectivamente. En un ejemplo con un MDE construido usando esteroimágenes obtenidas desde UAV en la provincia de Shandong, China, con una extensión de 2,86 Km². Se emplearon 83 pdc tomados con RTK GNSS con una exactitud vertical de 5 cm. El MDE construido tiene un paso de malla de 5×5 m aproximadamente, se emplearon los tres algoritmos de interpolación anteriormente comentados y se contrastaron con tres algoritmos de interpolación clásicos (Vecino más próximo, Kriging y ANUDEM (Australian National University DEM)), obteniendo mejores resultados con los algoritmos robustos cuando existe la presencia de atípicos. Entre los métodos robustos se sigue comportando mejor el método MQ-M, tal y como se observó anteriormente en el análisis con la superficie (no aporta información numérica de los resultados RMSE con el MDE).

163. SATGE, F.; DENEZINE, M.; PILLCO, R.; TIMOUK, F.; PINEL, S.; MOLINA, J.; GARNIER, J.; SEYLER, F.; BONNET, M.P. (2016). *Absolute and relative height-pixel accuracy of SRTM-GL1 over the South American Andean Plateau*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 121, pp. 157-166 // Se evalúa la exactitud del MDE global SRTM-GL1 en la Meseta Andina Sudamericana por comparación con los MDE SRTM v4 y ASTER GDEM v2. Se dispuso de 160.000 pdc extraídos de la base de datos ICESat/GLAS (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite/Geoscience Laser Altimeter System), con una incertidumbre vertical teórica de 15 cm, aproximadamente. La comparación de los valores de pendiente derivados de los MDE a nivel global frente a los obtenidos a partir de 265.000 pares de puntos de ICESat/GLAS se realizó usando un análisis estadístico categórico y cuantitativo introduciendo un nuevo índice: el Rango de Falsa Pendiente (FSR), este análisis estadístico relaciona el número de casos de pendiente que difieren, contrastando MDE y medición terreno, y el número de casos que coinciden en el valor de la pendiente. La zona de estudio ocupa una extensión de 192.390 Km², este altiplano andino se comparte por tres países (Bolivia, Perú y Chile). Se observó un sesgo negativo de 7 m en SRTM v4 y SRTM GL1, y un sesgo positivo en ASTER GDEM v2 de 0,8 m, sin embargo, SRTM GL1 tiene una desviación estándar (σ) de la altitud menor, y el modelo ASTER GDEM v2 el menor RMSE debido a un valor más bajo de error medio. En pendiente baja, tanto en SRTM v4 como en SRTM GL1, los resultados muestran los mismos valores, los cuales se incrementan con el aumento de la pendiente, debido probablemente también, al paso de malla del MDE. Generalmente SRTM GL1 da una estimación más exacta de la altitud que SRTM v4 para regiones de fuerte pendiente. Cuando comparan ASTER GDEM v2 y SRTM GL1 se muestra un error mayor pero menor desviación estándar. Para pendientes superiores a 10° SRTM GL1 da menores RMSE que GDEM v2. Una corrección del sesgo de 7 m en el SRTM GL1 mejora sus errores de elevación y decrece el μ y RMSE un 100% y 30%, respectivamente. La desviación estándar no cambia. Tras la corrección de este sesgo el SRTM GL1 es el MDE más exacto de los tres considerados.
164. KRISHNAN, S.; SAJIKUMAR, N.; SUMAM, K.S. (2016). *DEM Generation using Cartosat-I stereo data and its comparison with publically available DEM*.

International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST-2015). *Procedia Technology*, vol. 24, pp. 295-302 // El objetivo es generar un MDE de alta calidad a partir de Cartosat-I⁷ con datos estéreo usando el paquete Leica Photogrammetry Suite®. Se compara el MDE generado con el ASTER GDEM y el SRTM. La zona de trabajo se sitúa en Kerala (India) con una extensión de 6.970 Km². Para la evaluación se emplearon 27 pdc obtenidos por técnicas DGPS. Se extrajeron las altitudes de las posiciones de los 27 pdc en los dos MDE globales considerados y el MDE generado en este estudio a partir de Cartosat-I. Se observa exactitud del MDE_{Cartosat-I} es de mejor calidad que los generados hasta ahora desde esa misma fuente, gracias al procedimiento de procesado, con un RMSE= 36,79 m. Por otro lado, el RMSE obtenido desde el ASTER GDEM y el SRTM es de 8,13 y 8,98 m, respectivamente. Como conclusión se indica que la generación de MDE usando solamente puntos de unión entre estereopares no es la mejor forma de obtener un buen MDE, se hace necesario la captura de puntos de control terreno lo cual incrementaría el coste de la producción de los MDE. Sin embargo, el incremento del coste se justificaría si mejora la exactitud de modelos globales como SRTM o ASTER GDEM.

165. ISHIGURO, S.; YAMANO, H.; OGUMA, H. (2016). *Evaluation of DSMs generated from multi-temporal aerial photographs using emerging structure from motion-multi-view stereo technology*. *Geomorphology*, vol. 268, pp. 64-71 // El objetivo es la evaluación de la calidad de MDS generados usando la técnica SFM. Se adoptó un procedimiento en cuatro pasos: 1) Generar un MDS y ortofoto a partir de las fotografías aéreas más recientes (tomadas en 2.013) y puntos de control terreno obtenidos por GNSS; 2) Evaluación de la incertidumbre del MDS por comparación con pdc medidos mediante nivelación a partir de las redes de nivelación oficiales existentes en la zona (en total se emplearon 171 pdc); 3) Generar otros MDS históricos y ortofotos a partir de fotografías aéreas históricas (8 tomas entre los años 1.962 y 2.013) usando puntos de control terreno obtenidos del MDS_{2.013}; 4) Evaluación de la incertidumbre de todos los MDS históricos por comparación con los pdc obtenidos por nivelación. El paso de malla de los MDS es de 48,2 cm. La zona de estudios se sitúa en la Isla Kume (Japón). En el paso 3, los MDS generados contienen las incertidumbres del MDS_{2.013} más las incertidumbres del MDS de la fecha en cuestión, por lo que la incertidumbre final de cada MDS será la componente cuadrática de ambas. El $RMSE_{MDS2.013} = 24,1$ cm, en el caso de los MDS de fechas anteriores los valores extremos son $RMSE_{MDS1962} = 119$ cm y $RMSE_{MDS1994} = 5,8$ cm. Se concluye que con el uso de la tecnología propuesta se consigue generar MDS con incertidumbres comparables con los obtenidos mediante la fotogrametría convencional. Una de las ventajas sobre el LiDAR es la posibilidad de producir MDS históricos, gracias a la cantidad de documentación de vuelos realizados en diferentes épocas en los diferentes lugares de un territorio nacional como Japón. Otro de los beneficios es que produce MDS de alta calidad y bajo coste y se pueden producir fácilmente a partir de las fotografías aéreas. Otro de los potenciales de esta técnica es la generación de batimetría de aguas poco profundas.

⁷ Cartosat-I o IRS P5 (Indian Remote Sensing Satellite) es un satélite de Teledetección para aplicaciones cartográficas como la generación de MDE, lanzado por la Organización de Investigación Espacial India (ISRO).

166. GOULDEN, T.; HOPKINSON, C.; JAMIESON, R.; STERLING, S. (2016). *Sensitivity of DEM, slope, aspect and watershed attributes to LiDAR measurement uncertainty*. Remote Sensing of Environment, vol. 179, pp. 23-35 // Se simulan los valores límite de incertidumbres teóricas de las altitudes obtenidas con LiDAR y basadas en los parámetros de medición o adquisición de los datos y las condiciones del terreno para analizar su efecto en el modelado hidrológico. Se aplica la simulación de Monte Carlo para determinar la incertidumbre en una malla de pendientes y orientaciones, la incertidumbre en la delimitación de la cuenca hidrográfica y delineación de la red de cauces. La zona de estudio es la cuenca de Thomas Brook en Berwick, Nueva Escocia, Canadá, con una extensión de 689 Ha. Los datos para validar el MDE LiDAR proceden de un levantamiento RTK GPS (RMSE o $S < 2$ cm), se consideraron un total de 100 pdc. La incertidumbre del MDE y de la pendiente tiende a ser mayor en los límites del modelo y en las zonas de mayor pendiente, debido a la existencia de ángulos de incidencia muy elevados del pulso láser sobre el terreno. Los resultados muestran que la incertidumbre del MDE se sitúa en el rango entre 0,025 y 0,060 m, la incertidumbre de la pendiente entre 0,6° y 1,5°, la incertidumbre de la orientación entre 2,7° y 24,1°. Las incertidumbres del MDE y de la pendiente se correlaron con el ángulo de incidencia entre el pulso láser y el terreno, descrito mediante una función lineal. La incertidumbre en orientación y la pendiente del terreno mostró correlación que se podría describir como una función potencial decreciente. La variación en las cuencas hidrográficas fue menor del 1% lo cual indica que no es sensible a los errores de medidas LiDAR para el caso de estudio. La variabilidad de la longitud de las redes de cauces fue del 1,5% del total de longitudes, pero incrementando conforme el área de estudio se reduce. Las incertidumbres de la determinación de la cuenca y de la red de drenaje fue obtenida como la desviación estándar de varias simulaciones en la obtención de ambos parámetros, estas simulaciones se iniciaban con la selección manual aproximada del comienzo de los cursos de agua en un entorno de 1 Ha. Todos estos datos se pueden usar para optimizar el uso al que vayan destinados los datos LiDAR para asegurar que los objetivos del proyecto se consigan con la obtención de productos derivados.
167. BAADE, J.; SCHMULLIUS, C. (2016). *TanDEM-X IDEM precision and accuracy assessment based on a large assembly of differential GNSS measurements in Kruger National Park, South Africa*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 119, pp. 496-508 // La misión alemana radar TanDEM-X obtiene un MDE con una alta resolución geométrica, con elevada precisión y exactitud. En un primer momento (noviembre de 2014) se obtuvieron, para la zona de estudio, MDE intermedios de la misión (IDEM), con un paso de malla de 0.4 a 3 segundos de arco, para fines científicos, la incertidumbre vertical teórica, de los MDE, van de 2 m a 4 m según el grado de pendiente media del terreno. La zona de estudio se sitúa en el Kruger National Park de Suráfrica, con una extensión de 19.500 Km². El objetivo es validar la incertidumbre a nivel local de un IDEM. Se emplearon 10.059 pdc RTK-GPS para la validación, con una incertidumbre de 0,02 m, puntos que fueron seleccionados en 14 zonas diferentes de sabana.. Se utiliza una clasificación en 5 clases de cobertura del terreno: agua, presas de agua, terreno abierto o suelo desnudo, sabana con una superficie leñosa <35% y sabana densa con una superficie leñosa >35%. Finalmente, el estudio se centra en la clase de cobertura de sabana con poco porcentaje leñoso para

la evaluación de la incertidumbre. Para los MDE de 0,4 segundos de arco de paso de malla (≈ 12 m), los resultados de su contraste con los pdc son: sesgo medio de $0,20 \pm 0,05$ m (95% de intervalo de confianza), un RMSE = 1,03 m, y una incertidumbre vertical absoluta de 1,5 m. Para IDEM con pasos de malla menores, IDEM10 (1 segundo de arco, ≈ 30 m) e IDEM30 (3 segundos de arco, ≈ 90 m), y comparándolos con los MDE globales (ASTER GDEM2, SRTM41 y SRTMGL1), los resultados indican que TanDEM IDEM es de 5 a 10 veces más exacto.

168. KRSÁK, B.; BLISTAN, P.; PAULIKOVA, A.; PUSKAROVA, P.; KOVANIC, L.; PALKOVA, J.; ZELIZNAKOVA, V. (2016). *Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study*. Measurement, vol. 91, pp 276-287 // El objetivo es analizar la exactitud de MDE por medio de fotogrametría UAV de bajo coste. Se pretende poner de manifiesto lo adecuado de esta técnica frente al levantamiento topográfico tradicional mediante estación total, en el caso concreto de obtención de cartografía minera, donde es obligatorio obtener el volumen de material extraído cada año. La zona de estudio se sitúa en el área de Jastrabá (Eslovaquia). Se contemplan dos métodos de captura de información para este trabajo, por un lado, el uso de estación total (topografía clásica), y por otro lado, fotogrametría a partir de UAV de bajo coste, concretamente un Phantom 2 Vision+. La exactitud del MDE final depende de los datos de entrada, es decir, de la incertidumbre de la técnica de medida de los datos de entrada para la formación del MDE y de la técnica o algoritmo de interpolación empleado para generar el MDE. Se obtuvieron dos MDE, uno partiendo de los datos de topografía clásica (439 puntos) con RMSE= 0,043 m, y otro partiendo del vuelo realizado con el UAV. A partir de 237 pdc se obtiene que $RMSE_{UAV}=8,36$ cm. Posteriormente, haciendo uso del software Trimble RealWorks, se superpusieron ambos MDE, tomando como referencia el obtenido por topografía, y se determinaron las diferencias entre ambos, obteniendo una representación hipsométrica con un valor máximo de 834 mm. Las mayores diferencias se producen en los bordes y paredes de los frentes de la cantera o mina, sobre todo por los surcos de la escorrentía que se producen en la parte superior de esos taludes, estos son detalles que en el levantamiento de topografía clásica no quedan bien representados, sin embargo, en los levantamientos con láser escáner o mediante fotografías aéreas, se pueden representar y considerar. Como conclusión se establece que los levantamientos mediante fotogrametría con UAV de bajo coste cumple con los requerimientos de exactitud necesarios para la documentación minera en Eslovaquia.
169. MONDAL, A.; KHARE, D.; KUNDU, S.; MUKHERJEE, S.; MUKHOPADHYAY, A.; MONDAL, S. (2017). *Uncertainty of soil erosion modelling using open source high resolution and aggregated DEMs*. Geoscience Frontiers. Vol. 8, pp. 425-436 // Se analiza la incertidumbre de la modelización de la erosión a partir de MDE empleado el modelo de Ecuación de Pérdida de Suelo Universal Revisada. Se emplearon MDE globales: SRTM, ASTER y CartoSAT. La zona de estudio se sitúa en la cuenca del río Narmada en el estado de Madhya Pradesh (India), que cubre un área de 20.558 Km². El análisis se realiza variando el paso de malla de los MDE para conocer su influencia en los resultados. Se parte de 30 m y se remuestrea a 90, 150, 210, 270 y 330 m. Se utiliza entorno 100 pdc pertenecientes a la red de nivelación nacional. Como estadísticos para la evaluación de la incertidumbre se utilizan el RMSE, NMSE, el coeficiente Nash-Sutcliffe y el coeficiente de correlación (valores pequeños de RMSE

y NMSE significa menos discrepancia en altitudes, mientras que valores altos de Nash-Sutcliffe y correlación significa también menores discrepancias). Los valores para SRTM de RMSE= 13,31, 14,51 y 18,19 m y NMSE= 3,04, 3,32 y 4,25 m para el paso de malla de 30, 150 y 330 m respectivamente. Lo cual demuestra que al aumentar el paso de malla la incertidumbre del MDE decrece. En CARTOSAT los valores de RMSE= 13,93, 16,14 y 19,05 m, mientras que los valores NMSE= 3,30, 3,84 y 4,67 m, respectivamente. Los valores de ASTER observados se encuentran situados entre los valores de SRTM y CARTOSAT, por lo que el que presenta mejores incertidumbres es el MDE de SRTM. Los valores de Nash-Sutcliffe y Coeficiente de Correlación decrecen desde 0,949 a 0,931 y 0,979 a 0,967 en SRTM y 0,943 a 0,930 y 0,971 a 0,964 en CARTOSAT, mientras en ASTER van de 0,947 a 0,930 y 0,973 a 0,960, respectivamente, como se observa en este caso conforme aumenta el tamaño del paso de malla del MDE los valores de Nash-Sutcliffe y Coeficiente de Correlación disminuyen. Como conclusión se destaca el MDE de SRTM como más exacto y por tanto más apropiado para los estudios de modelado de erosión de suelos.

170. RIZZOLI, P.; MARTONE, M.; GONZÁLEZ, C.; WECKLICH, C.; BORLA TRIDON, D.; BRÄUTIGAM, B.; BACHMANN, M.; SCHULZE, D.; FRITZ, T.; HUBER, M.; WESSEL, B.; KRIEGER, G.; ZINK, M.; MOREIRA, A. (2017). *Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 132, pp. 119-139 // La misión TanDEM-X tiene como objetivo conseguir un MDE a escala global con una exactitud sin precedentes, basado en la tecnología SAR. El objetivo es evaluar el rendimiento del MDE de TanDEM-X, analizando las fuentes de error/incertidumbre que afecta a la calidad del MDE, finalmente el rendimiento es evaluado en términos de incertidumbre vertical. Las premisas iniciales establecían para el MDE producido una incertidumbre absoluta vertical inferior a 10 m, al 90% de intervalo de confianza, una incertidumbre vertical relativa al 90% del intervalo de confianza de 2 m, en zonas llanas u onduladas, y 4 m en zonas de fuerte pendiente, y un paso de malla de 12×12 m. Uno de los factores de incertidumbre en los MDE es el conocimiento exacto de la magnitud de la base línea entre los dos satélites, se estima que la incertidumbre en la medida es del orden de 1 mm, lo cual afecta a las alturas del terreno en el orden de 1 m. Otros factores de incertidumbre que afectan al MDE obtenido por InSAR son: la cubierta vegetal del terreno y las características morfológicas del mismo (en terreno de fuerte pendiente pueden afectar las sombras). La evaluación de la calidad del MDE TanDEM-X se lleva a cabo en tres tipos diferentes de cubiertas: forestal (más del 60% cubierto por bosque), nieve (más del 60% cubierto por hielo o nieve) y genérico (el resto de cubiertas de la superficie terrestre). Esta evaluación se establece por las diferencias de altitud entre TanDEM-X y ICESat (exactitud vertical menor de 1 m). Se eligió el ICESat como conjunto de datos de contraste por su cobertura global, así como por su incertidumbre. Se seleccionaron 1.000 pdc de ICESat para la evaluación tomando aquellos que presentaron las menores diferencias de altitud con el objetivo de eliminar puntos en los que las diferencias más elevadas pudieran ser provocadas por el diferente sistema de obtención de las imágenes, en un caso radar y en otro láser, que en superficie de nieve o hielo tiene un comportamiento diferente. Los resultados indican que para la cubierta de tipo genérico $\mu = 0,045$ m, para la cubierta de tipo forestal $\mu = 0,57$ m y en el caso de nieve $\mu = -2,83$ m. La incertidumbre absoluta al 90%

de confianza es 3,49 m, y si se eliminan o prescinde de las zonas forestales y de nieve la incertidumbre mejora a 0,88 m. La conclusión es que cumple con los objetivos planteados en la misión, y que se puede contrastar su calidad de una forma más precisa a nivel local mediante la comparación con MDE LiDAR o de otra fuente de alta exactitud.

171. YUE, L.; SHEN, H.; ZHANG, L.; ZHENG, X.; ZHANG, F.; YUAN, Q. (2017). *High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 123, pp 20-34 // El objetivo es conseguir un MDE global con un paso de malla de 30 m sin saltos ni discontinuidades, es decir, que se pueda considerar un MDE continuo en todo el globo terrestre. Se parte de los datos SRTM que en su última versión cubren una extensión del 80% de la superficie terrestre. Sin embargo, existen huecos y anomalías en algunas zonas o teselas en las que se divide el MDE de SRTM. Se propone un método para generar un MDE continuo combinando datos de SRTM-1, ASTER GDEM v2 y el altímetro láser de ICESat. Se utilizan los datos de ASTER GDEM para rellenar esos huecos existentes en SRTM, se incorporan los datos de ICESat para mejorar la exactitud de los datos de relleno usando un modelo de red neuronal artificial. Posteriormente se emplea una red de triángulos irregulares basada en el método de relleno de la superficie delta (DSF, Delta Surface Fill) con el fin de eliminar el posible sesgo que pueda existir entre los datos corregidos de ASTER, y los datos SRTM. Finalmente, se aplica un filtro de atípicos adaptativo a todos los datos. El resultado final es un MDE sin discontinuidades ni saltos. Para la evaluación de la exactitud del MDE obtenido se emplean los datos de ICESat (capturados entre 2003 y 2009). La zona de estudio se centró en China, que comprende 85 teselas de MDE SRTM con huecos y anomalías, algunas de las teselas llegan al 30% de huecos en la superficie total de la tesela. Utiliza tres estadísticos para expresar la incertidumbre del MDE: el error absoluto medio μ , la desviación estándar σ , y RMSE. Se emplearon un total de 15,27 millones de pdc procedentes del ICESat para toda China. Los resultados tras el análisis son los siguientes: $\mu=5,749$ m; $\sigma= 14,918$ m y RMSE=15,205 m. También se evaluaron con los mismos pdc los MDE SRTM y ASTER dando los siguientes valores para cada uno $\mu=5,784$ m; $\sigma= 16,215$ m; RMSE=16.487 m y $\mu=10,905$ m; $\sigma=20,249$ m; RMSE=20,467 m, respectivamente. Como se observa los datos del MDE fusionado presentan una mejora en la exactitud con respecto a los MDE de SRTM y ASTER.
172. BALTENSWEILER, A.; WALTHERT, L.; GINZLER, C.; SUTTER, F.; PURVES, R.S.; HANEWINKEL, M. (2017). *Terrestrial laser scanning improves digital elevation models and topsoil pH modelling in regions with complex topography and dense vegetation*. Environmental Modelling & Software, Vol. 95, pp 13-21 // Analiza MDE derivados de TLS con el fin de observar cuáles pueden ser sus posibilidades en levantamientos de varias hectáreas de terreno con relieve irregular, y su influencia en productos derivados, concretamente en la modelación del pH de la capa superficial del terreno. El lugar de estudio se sitúa en el valle de Alptal en Suiza, son 2 Ha pertenecientes al programa de Investigación de Ecosistema Forestal Suizo a largo plazo. Para el estudio se emplean datos ALS con una incertidumbre inferior a 0,08 m en altura, datos TLS con una incertidumbre teórica de 0,005 m en altura, datos de una estación total, con una incertidumbre en altura de 0,002 m, y un conjunto de datos LiDAR de la base de datos SwissAlti disponible a nivel nacional que tienen $\sigma= 0,5$ m

en altura. Se emplearon dos algoritmos de interpolación para la generación de los MDE a partir de los datos, por un lado, el Método de ponderación inversa a la distancia (se usó con una potencia de dos y un radio de búsqueda variable de los 12 puntos más cercanos), y el Método TIN. Tanto para ALS como para TLS se generaron MDE con diferentes pasos de malla, a 0,2, 0,5, 1, 2 y 4 m. Para los datos del SwissAlti se generó sólo un MDE a un paso de malla de 2 m. Con una estación total se obtuvieron 56 pdc para la evaluación de los MDE, para tal fin se emplearon los siguientes estadísticos: Media de las desviaciones o diferencias entre altitudes, desviación estándar, media absoluta y RMSE), también se obtuvieron medidas robustas (la mediana y la desviación absoluta mediana normalizada NMAD ($NMAD=1.4286 * \text{mediana}_j(|\Delta h_j - m_{\Delta h}|)$)). Por otro lado, también se pueden eliminar los atípicos eliminando aquellos valores que se encuentren bajo el umbral de 3 veces del valor de σ . Los resultados indican que la mediana muestra una predicción sistemática superior para todos los MDE, excepto para el TLS de 4 m de paso de malla y algoritmo de interpolación TIN. Las medidas estadísticas de incertidumbre estándar fueron similares a las medidas robustas, por lo que no indica una distribución de no normalidad severa y se adoptó el valor RMSE para expresar la exactitud de los MDE. Generalmente los de menor paso de malla son los más exactos, que fueron los TLS de 0,2 y 0,5 m de malla, con valores de RMSE de 0,12 y 0,14 m, respectivamente, independientemente del método de interpolación. Al tamaño de malla de 1×1 m los valores de RMSE fueron muy próximos tanto en TLS como ALS. Para pasos de malla de 0,2, 0,5 y 1 m el interpolador TIN da valores más bajos de RMSE. Sin embargo, para pasos de malla mayores, los MDE basados en ALS interpolados por TIN fueron más exactos que los MDE basados en TLS, mientras esta tendencia no fue tan evidente para el interpolador de Ponderación Inversa a la Distancia. Los valores de RMSE pertenecientes al SwissAlti fueron considerablemente mayores en cualquier circunstancia.

173. ELKHRACHY, I. (2017). *Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia*. Ain Shams Engineering Journal, Artículo en prensa. // El propósito es la evaluación de la exactitud de los MDE de descarga gratuita SRTM y ASTER. La zona de estudio es la ciudad de Najran en Arabia Saudí, con una extensión de 45×20 Km. La incertidumbre (RMSE) de los MDE evaluados se supone que es del orden de 16 m en absoluto y 6 m en relativo. Los datos de mayor exactitud empleados para la evaluación provienen de dos vías: 1) mapas topográficos a E10k, y 2) datos obtenidos por GPS conformando una nube de puntos elegida aleatoriamente sobre la zona de estudio. La exactitud de los pdc obtenidos a partir de la cartografía topográfica es de 0,95 m. Los pdc obtenidos por RTK GPS tienen una exactitud de 0,10 m. Para la expresión de la exactitud utiliza el estadístico RMSE. Los resultados que se han obtenido han sido: usando los datos GPS el RMSE de ASTER es de 5,07 m y de SRTM 5,94 m. Usando los datos del mapa topográfico el RMSE de ASTER es de 7,97 m y de SRTM de 6,87 m. Se concluye que a pesar de que teóricamente la incertidumbre del MDE SRTM es menor que la de ASTER en este caso y concretamente con datos de contraste GPS (que tienen mayor exactitud) es más exacto el MDE ASTER, esto se debe al diferente comportamiento de ambos MDE a nivel global, según la zona considerada, según sus características (morfología, vegetación, etc.).

174. WESSEL, B.; HUBER, M.; WOHLFART, C.; MARSCHALK, U.; KOSMANN, D.; ROTH, A. (2018). *Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 139, pp 171-182 // Este trabajo evalúa la exactitud del MDE TanDEM-X usando dos conjuntos de datos GPS, como datos de contraste, estos datos se distribuyen a través de todos los continentes, por lo que se considera una evaluación global del MDE. Se utilizan 3 millones de pdc GPS cinemático, en 19 tracks, cubriendo una longitud total de 66.000 Km. El segundo conjunto de datos son 23.000 pdc obtenidos con GPS, en este caso se trata de señales fijas, tales como vértices geodésicos o señales fijas, esta información es suministrada por el US National Geodetic Survey (NGS), se reparten en 14 cubiertas del suelo diferentes. Entre ambos conjuntos de datos GPS la incertidumbre media absoluta del MDE TanDEM-X es menor de 0,20 m, un RMSE por debajo de 1,4 m y una exactitud lineal al 90% de probabilidad por debajo de 2 m. Los valores de RMSE son más sensibles a la cobertura del suelo, para vegetación baja el RMSE es 1,1 m, mientras que en vegetación media es de 1,4 m y en zonas de bosque de 1,8 m. Concluye estableciendo el interés de este estudio que al ser un contraste global puede ser útil para aplicaciones científicas o comerciales, etc.
175. KULP, S.A.; STRAUSS, B.H. (2018). *CoastalDEM: A global coastal digital elevation model improved from SRTM using a neural network*. Remote Sensing of Environment, vol. 206, pp. 231-239 // Se parte de considerar que existe una subestimación de los riesgos de inundación en la costa originados por el sesgo presente en los MDE de SRTM. Para corregir este sesgo ha habido varios intentos: modelos de regresión que predicen la incertidumbre en altura, etc. Pero esos intentos se han reducido a considerar la incertidumbre ocasionada por la vegetación solamente. En este trabajo se emplea una red neuronal artificial Perceptrón multicapa para realizar un análisis de regresión 23-dimensional de la incertidumbre vertical, donde además de los índices de cubierta vegetal, se usa otras variables como: valores de altitud vecinos, densidad de población, pendiente del terreno y desviaciones locales de las altitudes de SRTM observadas a partir de altitudes de ICESat. Usando datos LiDAR como datos de contraste. La red neural la entrenan con muestras de datos sobre EE.UU. y Australia. El ajuste reduce el sesgo vertical medio en la costa americana desde 3,67 m a 0,01 m, y en Australia desde 2,49 m a 0,11 m. El valor del RMSE se reduce a la mitad en ambas localizaciones, desde 5,36 m a 2,39 m en Estados Unidos, y de 4,15 m a 2,46 m en Australia. Usando como datos de contraste los datos de ICESat, el sesgo global cae de 1,88 m a -0,29 m, y el RMSE de 4,28 m a 3,08 m. El resultado mejora el MDE global a nivel de costas (CoastalDEM), asegurando una mejor exactitud y una mejora a nivel global para controlar el aumento del mar y analizar las inundaciones costeras a nivel mundial.
176. ALGANCI, U.; BESOL, B.; SERTEL, E. (2018). *Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models*. ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 7, issue 3, 114 // Se evalúa la exactitud de MDS a nivel global de origen satelital y de acceso gratuito y libre. Se emplearon los MDS de ASTER (30×30 m), SRTM (30×30 m) y ALOS (30×30 m). Además, se produjeron MDS, con un paso de malla de 3 m y 1 m, a partir de imágenes tri-estéreo de satélites SPOT 6 y alta resolución Pleiades, respectivamente. Como datos para el contraste se emplearon MDS elaborados a partir de vuelos fotogramétricos, y facilitados por la Agencia Cartográfica Nacional Turca (Comando General Cartográfico), con un paso de malla de 5 m y una incertidumbre

mejor de 1 m y 3 m al 90% del intervalo de confianza en zonas llanas y montañosas, respectivamente. La zona de estudio se sitúa en el área metropolitana de Estambul (Turquía). Se realizaron varios contrastes de los MDS utilizando pdc extraídos del MDS de la Agencia Cartográfica Nacional Turca. En primer lugar, a partir del MDS utilizado como contraste se extrajeron 25 pdc en zonas despejadas de vegetación. En un segundo procedimiento se extrajeron 1.030 pdc aleatoriamente seleccionados por toda la zona de estudio, estratificando la muestra en diferentes intervalos de altitud. En el tercer, y último procedimiento, se extrajeron perfiles longitudinales en diferentes direcciones y con un intervalo angular de 45° de una dirección a otra. Los resultados para el primer procedimiento son: el MDS obtenido por imágenes tri-estéreo de Pleiades es el que da un RMSE más bajo 1,57 m, frente al MDS de ASTER que da el valor más alto con 5,72 m. ALOS y SPOT dan un aceptable valor de RMSE (2,14 y 2,26, respectivamente). La desviación estándar dio los valores más bajos para Pleiades, SPOT y ALOS, lo que indica que los valores de diferencia de altitudes para los distintos pdc fueron muy similares en la mayoría. En el segundo procedimiento, de nuevo, los MDS de Pleiades y SPOT dan los valores de RMSE más bajos (4,23 y 5,09 m) frente al MDS de ASTER con un valor más alto (6,92 m). Agrupando los pdc en función de la cubierta del suelo (Bosque, industrial, residencial escaso, residencial, carreteras y edificios altos). Se observa que los valores de RMSE para cada uso del MDS SPOT son los más próximos entre sí y los mejores respecto a la media, el MDS de Pleiades da valores muy similares a los de SPOT, en el caso del MDS de ALOS tiene buenos resultados en general también salvo en las zonas de edificios altos y bosque en los que la exactitud disminuye. En el caso del tercer procedimiento de los perfiles longitudinales, se dividieron en porciones de 1.000 m, en una observación visual ALOS, ASTER y SRTM estaban muy juntos al perfil del MDS de referencia, aunque su resolución espacial no es suficiente para detectar algunos edificios individuales, en el caso de SPOT y Pleiades sí quedaban registrados esos detalles.

Acrónimos y Abreviaturas

ACP Análisis de Componentes Principales.

AGNPS Agricultural Non-Point-Source Pollution Model.

ALS. Airborne Laser Scanning.

ALOS PRISM Advanced Land Observing Satellite – Sensor pancromático PRISM.

ANUDEM Australian National University DEM.

ASCE American Society of Civil Engineers.

ASLSM Accuracy Standards for Large Scale Maps.

ASPRS American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection.

CBERS China Brazil Earth Resources Satellite.

DCW Digital Chart of the World.

DESDynI Deformation, Ecosystem Structure and Dynamics of Ice.

DGPS Differential GPS.

DMA Defense Mapping Agency.

DoD Department of Defense of USA.

DORIS Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite.

DTED Digital Terrain Elevation Data.

EGM96 Earth Gravitational Model 96.

EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service.

EMAS Engineering Map Accuracy Standard.

EMAS Engineering Map Accuracy Standard.

ENVISAT Environmental Satellite.

ERS European Remote Sensing Satellite.

FEMA Federal Emergency Management Agency.

FGDC Federal Geographic Data Committee.

GEDTF Global Elevation Data Testing Facility.

- GLSDEM** Global Land Survey Digital Elevation Model.
- GPS / RTK** Global Position System / Real Time Kinematic
- GNSS** Global Navigation Satellite System.
- DGPS** Differential Global Position System.
- HR-CCD** High Resolution Charge Couple Device.
- HRS** High Resolution Stereoscopic
- ICA** Instituto Cartográfico de Andalucía (actualmente IECA, Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía).
- ICESat/GLAS** Ice, Cloud and land Elevation Satellite / Goescience Laser Altimeter System.
- IGN** Instituto Geográfico Nacional.
- IMU** Inertial Measurement Unit.
- InSAR** Interferometry Synthetic Aperture Radas
- IRS** Indian Remote Sensing Satellite.
- ISPRS** International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- LANDSAT 7 ETM+** Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper.
- LGD** Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen.
- LIDAR** Laser Imaging Detection and Ranging.
- MDE** Modelo Digital de Elevaciones.
- MDS** Modelo digital de superficie.
- ME** Mean Error (Valor medio de las diferencias entre altitudes, similar a μ en una distribución Normal).
- MSE** Mean Square Error (Error cuadrático medio).
- MSF** Modified Single – Flow Direction Model.
- NMSE** Error cuadrático normalizado.
- NMAD** Normalized Median Absolute Deviation.
- NMAS** National Map Accuracy Standards.
- NSSDA** National Standard for Spatial Data Accuracy.
- OS** Ordnance Survey.

- OTAN** Organización del Tratado del Atlántico Norte.
- pdC** Punto de control (puntos de control).
- RMSE** Root Mean Square Error.
- RBF** Radial Basis Functions.
- RBFI** Interpolación de Base Radial.
- RUSLE** Revised Universal Soil Loss Equation.
- SAR** Synthetic Aperture Radar.
- SFM** Structure from Motion.
- SIG** Sistema de Información Geográfica.
- SPOT** Satellite Pour l'Observation de la Terre.
- SRTM / GL1** Shuttle Radar Topography Mission / Global 1-arc second.
- SWAP** Soil, Water, Atmosphere and Plant.
- SWAT** Soil and Water Assessment Tool.
- TanDEM-X CoSSC** TanDEM-X Coregistered Single Look Slant range Complex.
- TLS** Láser Scanner Terrestre.
- TIN** Triangulated Irregular Network.
- TTD** Tactical Terrain Data.
- UAV** Unmanned Aerial Vehicles.
- USDA-NRCS** United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.
- USGS** United States Geological Survey.
- VNIR** Visible and near-infrared.
- WAAS** Wide Area Augmentation System.
- WGS84** World Geodetic System 84.

METADATOS	
Título	Evaluación de la Calidad en Modelos Digitales de Elevaciones. Bibliografía Comentada
Autores	Mesa Mingorance, J.L.; Ariza López, F.J.
Materia	Información Geográfica, Calidad de los datos, Modelos Digitales de Elevaciones.
Descripción	Se realiza una revisión bibliográfica de una selección de publicaciones científicas relacionadas con aspectos relativos a la evaluación de la calidad de los Modelos Digitales de Elevación, en algunos casos tratando su exactitud altimétrica directamente, y en otros casos, analizando la calidad funcional de los Modelos Digitales de Elevaciones. Cada comentario bibliográfico se centra en el proceso seguido en la evaluación de la calidad del Modelo Digital de Elevación.
Editor	Grupo de Investigación Ingeniería Cartográfica. Universidad de Jaén.
Fecha	2019-11-03
Tipo de recurso	Texto
Formato	Pdf
ISBN	978-84-09-15226-1
Fuente	Elaboración propia
Idioma	Español
Relación	
Cobertura	
Derechos	Los autores
Audiencia	Personal técnico en información geográfica

Evaluación de la Calidad en Modelos Digitales de Elevaciones. Bibliografía Comentada.

Los Modelos Digitales de Elevaciones son un producto cartográfico con una larga tradición en el ámbito del tratamiento de la Información Geográfica, especialmente en los Sistemas de Información Geográfica, aportando la componente altimétrica del espacio geográfico. Los Modelos Digitales de Elevaciones se emplean en diferentes áreas del conocimiento, como por ejemplo Ingeniería Civil, Geología, Botánica, etc. Dada su importancia para la obtención de modelos derivados en esas diferentes áreas del conocimiento, es importante expresar la calidad del Modelo Digital de Elevaciones que empleamos, ya que un uso adecuado del mismo conducirá a la obtención de los resultados adecuados en cualquier análisis o estudio en los que se requiera el uso de Modelos Digitales de Elevaciones. Los autores en esta obra han realizado una revisión bibliográfica comentada de una selección de artículos científicos, libros y tesis doctorales, en las se considera la calidad del Modelo Digital de Elevaciones y su influencia en modelos derivados o simplemente en la obtención de la altitud de una serie de localizaciones.

Con esta obra se quiere reseñar la importancia de expresar, y cómo expresar, la calidad del Modelo Digital de Elevaciones, ya que repercutirá en los modelos derivados obtenidos o en las conclusiones de nuestro análisis o trabajo.



Grupo de Investigación Ingeniería Cartográfica



UJa.
Universidad de Jaén

