

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE DISTINTOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO, PARA SU USO EN MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA.

Mario Martín SANZ-MUÑOZ^a, Juan Martín AGUILAR-VILLEGAS^b, Luis Carlos BRAVO-PEÑA^c

^a Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. De las Américas y Av. Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa. Email: est.mariosanzm@uas.edu.mx

^b Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. De las Américas y Av. Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa. Email: a_villegas@uas.edu.mx

^c Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Licenciatura en Geoinformática. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Cd. Cuauhtémoc Chihuahua. Email: luis.bravo@uacj.mx

RESUMEN

Usualmente se utiliza el Error Medio Cuadrático de Z como un indicador de la calidad de un Modelo Digital de Terreno (MDT). Sin embargo este parámetro por sí solo no refleja si el MDT es apropiado para realizar modelizaciones hidrológicas, en particular porque en este caso también se requiere que haya correspondencia entre la red real de drenaje y la red de drenaje modelada en el MDT. En este trabajo se analiza y compara la calidad de dos MDT para modelización hidrológica, mediante estimadores del error vertical (fidelidad en Z) y el error posicional o fidelidad en X y Y, de la red de drenaje. El primero de los MDT fue obtenido mediante el procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas de alta resolución espacial, y el segundo, corresponde a una sección del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) generado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los resultados indican que, no obstante su costo en tiempo y trabajo, la generación de un MDT por fotogrametría, representa una opción más apropiada para la modelización hidrológica respecto al uso de MDT de distribución gratuita. Asimismo, por la magnitud de los errores observados, presenta una relación beneficio/costo que le hace competitivo frente a otros productos generados por métodos más sofisticados.

Palabras clave: Error Medio Cuadrático (EMC), Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0).

ABSTRACT

Root mean square is often used as Digital Elevation Model (DEM) quality assessment. However this parameter does not suggest if DEM is appropriated for hydrological modelling, particularly because in this case it is also necessary that a correlation exist between real drainage and DEM's modeled drainage network. In this paper, two DEM's quality for hydrological modelling are analyzed and compared, trough vertical error, and modeled drainage positional errors assessment. The first DEM was obtained by photogrammetric processing of high resolution aerial imagery, and the second one was extracted from "Continuo de Elevaciones Mexicano" generated by "Instituto Nacional de Estadística y Geografía" (INEGI). Although cost and time, results indicate that photogrammetric DEM generation is a better option for hydrological modelling than free distribution DEM's. Also, by accuracy assessment, DEM obtained by photogrammetric techniques represents a benefit/cost advantage than other products obtained by most sophisticated methods.

Keywords: Root Mean Square (RMS), Mexican Continuous Elevations (MCE).

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de un MDT depende del tipo y magnitud de los errores. Estos son inevitables, pues son representaciones simplificadas de la realidad (Felicísimo, 1994). La evaluación en la calidad de un MDT se realiza comparando mediciones directas sobre el terreno. En este caso se utilizan Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), cuyos valores obtenidos en el terreno son comparados con los valores provistos en la superficie de los MDT, mediante indicadores estadísticos como el Error Medio Cuadrático (EMC) y la desviación estándar altitudinal (Pérez Vega & Mas, 2009), (Fisher, 1998). Estos análisis resumen los errores altitudinales en los MDT en un simple valor estadístico, sin indicar de forma concluyente si el MDT es apropiado para la modelización hidrológica de áreas de inundación, donde además de un error altitudinal aceptable, se requiere que la red superficial de drenaje obtenida mediante modelación en el MDT, sea fiel a la realidad del terreno. Esto es evidente cuando no existe aleatoriedad del error en el MDT, pero los errores son pequeños. En estos casos, el EMC puede ser pequeño, aunque la red de drenaje modelada difiera sustancialmente de la red de drenaje real.

En el presente trabajo se evaluó y comparó la calidad para la modelación hidrológica de dos MDTs, mediante el EMC y la correspondencia de la red de drenaje modelada de ambos MDT, con los valores terreno y la red real de drenaje. Los resultados indican que la generación de un MDT mediante procesos fotogramétricos sigue siendo una buena opción, en términos de la relación beneficio costo, frente a los MDT distribuidos por fuentes oficiales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio (figura 1) corresponde a una parte de la zona conurbada de la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Se ubica entre los 24°47' a los 24°50' latitud norte, y los 107°20' a los 107°24'

longitud oeste, con una altura media de 50 m sobre el nivel del mar, ocupando un área de 40 km².

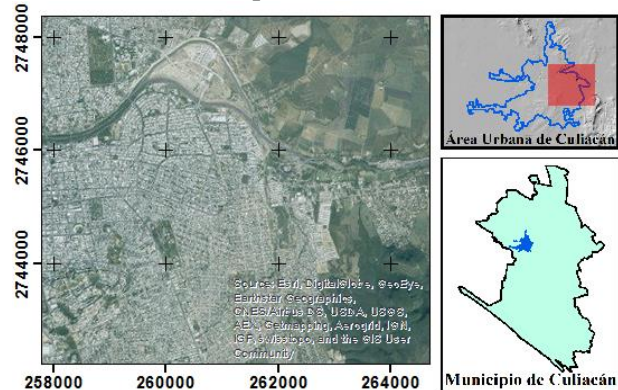


Figura 1. Área de Estudio

Análisis Estadístico de los MDTs

Se analizaron dos MDT. El primero se generó mediante procesos fotogramétricos utilizando 8 imágenes aéreas obtenidas por INEGI, el 20 de febrero de 1995, a escala 1:20,000. En este caso, fueron necesarias 6 campañas de trabajo de campo y un periodo de 2 meses de trabajo de gabinete, fue utilizado un receptor GPS Ashtech Z Extreme, estimándose un valor de \$30,000.00 en la generación del MDT. El segundo fue extraído del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) generado por INEGI, construido a partir de la conversión digital de datos vectoriales de cartas topográficas e hidrológicas en formato analógico a escala 1:50,000, 1:250,000 y 1:1,000,000 (INEGI), utilizando el método de interpolación ANUDEM, diseñado para generar MDT hidrológicamente correctos (Hutchinson, 1988).

Ambos MDT se exportaron a formato TIFF, se importaron al programa ArcGIS y fue creado un shapefile con los puntos de la aerofototriangulación. Posteriormente, utilizando la herramienta Extract Multi Values to Points, se obtuvieron los valores en el eje Z de ambos MDT correspondientes a las coordenadas X, Y de los puntos de la aerofototriangulación. La diferencia corresponde a los errores altitudinales, obteniendo el EMC mediante la ecuación:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - e_i)^2}{n}}$$

Donde:

E_i – Coordenada en el eje Z de los puntos de la aerofototriangulación.

e_i – Coordenada en el eje Z del MDT en cada uno de los puntos de la aerofototriangulación.

n – Número de puntos de la aerofototriangulación.

El rango de error de los errores altitudinales se define mediante la siguiente función:

$$R = E_{max} - E_{min}$$

Donde:

R – Es el rango de la muestra.

E_{max} – Es el error máximo de la muestra.

E_{min} – Es el error mínimo de la muestra.

El rango de error de la muestra a su vez se clasifica en 10 segmentos de error. El ancho de segmento de error se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\Delta E = \frac{R}{10} = \frac{E_{max} - E_{min}}{10}$$

Donde:

ΔE – Es el intervalo del segmento de error.

Obtenidos los intervalos, se construyeron los histogramas de frecuencia de error.

Distribución Espacial del Error

Los indicadores estadísticos como el EMC y la desviación estándar, no describen el error posicional en X y Y de la red de drenaje, aspecto fundamental para la modelización hidrológica. Por esta razón, es requisito indispensable analizar la variación espacial del error en el MDT (Carlisle, 2005).

Además, la certeza en la estimación de la calidad de un MDT puede verse afectada debido al número y la precisión de los puntos de control de campo (PC) utilizados y su distribución sobre el área de estudio (Li, 1991). Diversos trabajos asignan un peso importante a estas consideraciones al evaluar la calidad de un MDT mediante información de campo (Hobi & Ginzler, 2012).

Para evaluar la distribución espacial del error se construyó un mapa de puntos que contiene las coordenadas Z de cada MDT, y la correspondiente Z del terreno. A cada punto se le calculó el error

absoluto, y con estos errores y sus coordenadas XY, se elaboraron dos mapas de isoclinas de error, para apreciar espacialmente la distribución de los errores. Luego estos valores fueron interpolados utilizando el método IDW (Inverse Distance Weighted), el cual interpola los errores altitudinales de ambos MDT sobre una superficie, mediante la técnica de distancia inversa ponderada. (*GIS Tutorial 3*, 2010).

Análisis de la Red de Drenaje Modelada

La red de drenaje modelada de cada MDT se obtuvo en la plataforma ArcGIS, mediante operadores de contexto espacial (*GIS Tutorial 3*, 2010). Estos mapas fueron sobrepuestos a un compuesto de color de una imagen GeoEye remuestreada a una resolución espacial de 50 cm (ESRI, Digital Globe), proporcionada por ArcGIS. En la imagen satelital y en ambos mapas de acumulación de flujo se identificaron y digitalizaron los nodos que dan origen a escorrentías de órdenes superiores (2^{do} orden, 3^{er} orden, etc.), (Strahler & Strahler, 2004) y determinó sus coordenadas espaciales (Figura 2).

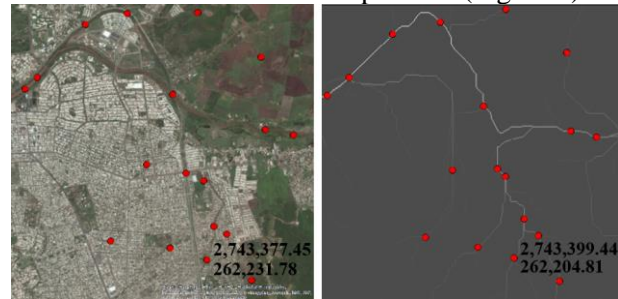


Figura 2. Obtención de las coordenadas de los nodos. Izquierda: Red real de drenaje. Derecha: Red de drenaje modelada con el MDT de INEGI.

Se compararon 20 nodos de la red real de drenaje, con los correspondientes nodos de la red de drenaje modelada. El *error posicional*, o desfaseamiento en X y Y, se determinó mediante el EMC, conforme la siguiente función:

$$\Delta n = \sqrt{(X_N - X_n^2) + (Y_N - Y_n^2)}$$

Donde:

Δn – Es el error posicional en cada nodo.

X_N y Y_N - Son los valores X, Y respectivamente de los nodos de la red real de drenaje.

Xn y Yn – Son los valores X, Y respectivamente de los nodos de la red de drenaje modelada. De esta forma se calculó el EMC *posicional* de las redes modeladas de drenaje:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta n)^2}{n}}$$

Con los *errores posicionales* entre los nodos de la red real de drenaje y los nodos de ambas redes de drenaje modeladas, se obtienen los segmentos de error, su frecuencia, así como sus histogramas de frecuencia.

La red de drenaje modelada con el MDT del área de estudio también se comparó con la ortofoto del área de estudio. El análisis fue realizado utilizando una muestra de 30 nodos obtenidos mediante fotointerpretación sobre la ortofoto, comparados con sus nodos homólogos derivados del MDT generado mediante procesos fotogramétricos en este trabajo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Errores Altitudinales:

Las figuras 3 y 4 muestran los histogramas de frecuencia de error altitudinal. Para el MDT generado en este trabajo se utilizaron 78 PC, resultando un EMC de 0.12 m. En este MDT, los valores extremos de error aparecen con baja frecuencia, concentrándose la mayor parte de la muestra en rangos alrededor de cero. Para el MDT de INEGI se utilizaron 81 PC, con un EMC de 18.05 m, y en contraste con los resultados del MDT del área de estudio, la distribución de los segmentos de error no es homogénea, todos los errores son positivos y la concentración de los mismos no se encuentra sobre los valores centrales del histograma.

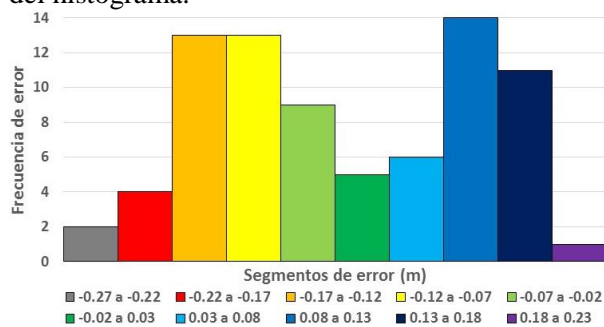


Figura 3. Histograma de frecuencia de los errores altitudinales del MDT del área de estudio.

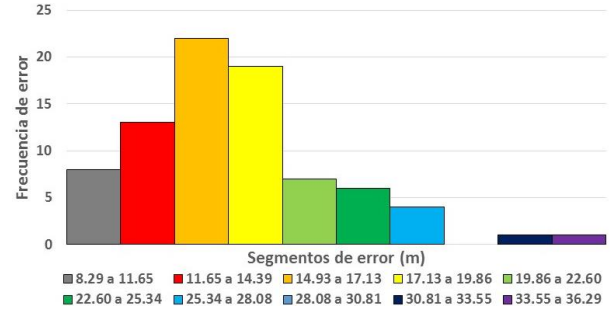


Figura 4. Histograma de frecuencia de los errores altitudinales del MDT de INEGI.

Los mapas de isolíneas de error (figuras 5 y 6) muestran la distribución espacial de los errores altitudinales de los MDT. En el MDT generado en este trabajo, se aprecia una distribución homogénea y uniforme del error sobre el área de estudio, a excepción de errores puntuales en zonas montañosas, donde la componente vertical es más inestable. Para evaluar la aleatoriedad del error se obtuvo el índice de Moran para los errores espacialmente distribuidos, tanto del valor terreno y el MDT generado en este trabajo, como en el caso del valor terreno y el MDT de INEGI. Este índice es una medida de autocorrelación de valores y es más alto (sus valores van de -1 a 1) en la medida que los valores tienen una distribución menos aleatoria (Moran, 1948; Galon, González, & Pantoja, 2011). En este caso se obtuvieron valores de 0.13 para el error en el MDT de INEGI, y de -0.04 para el error del MDT de este trabajo, lo que sugiere menos aleatoriedad de error del MDT de INEGI. Cabe decir que en ambos casos, la comparación se hizo con una muestra de 71 puntos de valores terreno, pues son los datos disponibles en el área de traslape de ambos MDT. Sin embargo, la afirmación puede hacerse más robusta si se involucra mayor número de PC.

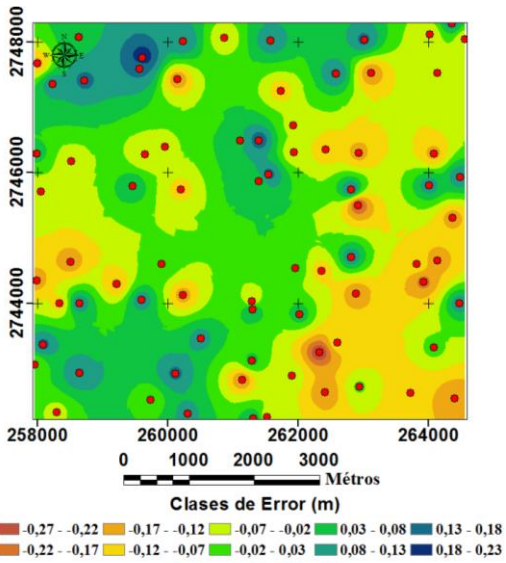


Figura 5. Mapa de isólinas de error del MDT del área de estudio.

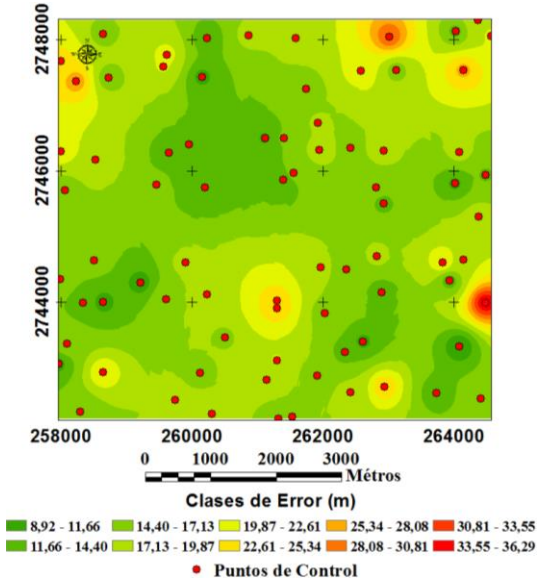


Figura 6. Mapa de isólinas de error del MDT de INEGI.

Error Posicional de la Red de Drenaje Modelada Respecto a la Red Real de Drenaje.

Las figuras 7 y 8 muestran los histogramas de frecuencia de los errores posicionales entre las redes de drenaje modeladas con ambos MDT y la red real de drenaje observada en imágenes satelitales de alta resolución espacial. La figura 9 muestra el histograma de los errores posicionales de la red modelada con el MDT generado en este

trabajo con respecto a la red real obtenida de la ortofoto.

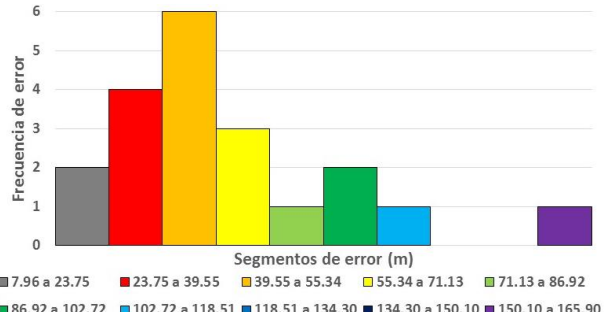


Figura 7. Histograma de frecuencia de los errores posicionales de la red de drenaje modelada con el MDT del área de estudio.

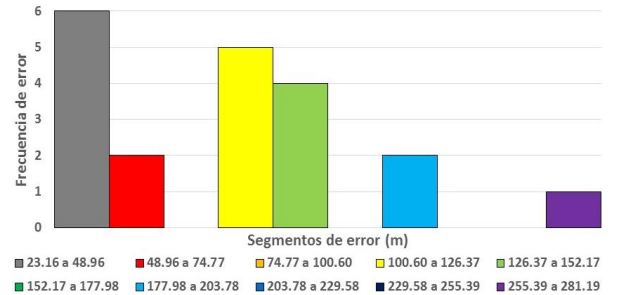


Figura 8. Histograma de frecuencia de los errores posicionales de la red de drenaje modelada con el MDT de INEGI.

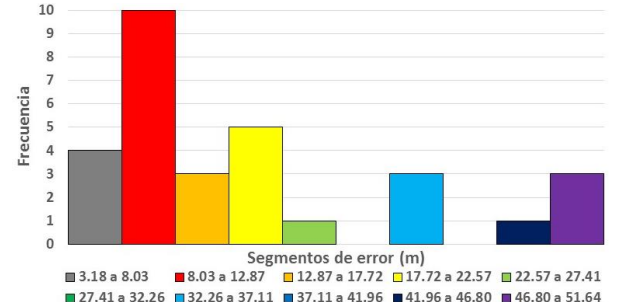


Figura 9. Histograma de frecuencia de los errores posicionales de la red de drenaje modelada con el MDT del área de estudio comparada con la red real de drenaje obtenida de la ortofoto.

Comparadas con la red real de drenaje, la red modelada con el MDT generado en este trabajo, resulto con un EMC de 68.97 m. Por su parte, la red modelada con el MDT de INEGI tuvo EMC de 123.67 m. Esto indica que ambas redes modeladas difieren de la red real de drenaje obtenidas en imágenes de alta resolución, aunque el error es menor en el primer MDT. Por el contrario, los errores posicionales resultantes de comparar la red de drenaje de la ortofoto y la red modelada con el

MDT generado mediante fotogrametría, indican que este reproduce de forma mucho más fiel la red real de drenaje, resultando con un EMC de 23.92 m, en el cual el 63% de los nodos de la muestra tienen un error *posicional* menor a 20 m. En cuanto a los errores posicionales, hay poca información publicada al respecto, pero el EMC del MDT de INEGI (123.67 m) es muy similar a la magnitud de errores medios encontrados en las redes de drenaje generada en MDT de sensores como ASTER (117.2 m) y SRTEM (121.6 m) (Czubski, Kozak, & Kolecka, 2013), pero el error del MDT generado por fotogrametría de imágenes aéreas es 5 veces menor (23.92 m), que para efecto de estudio de escurrimientos es aceptable.

4. CONCLUSIONES

Considerando los resultados, el MDT generado en este trabajo parece mejor para la modelización hidrológica respecto al MDT de INEGI. Tiene menor error altitudinal, y los *errores posicionales* entre la red de drenaje modelada y la realidad son menores respecto a lo observado en el MDT de INEGI. Por lo tanto se considera útil como fuente de información para realizar análisis hidrológicos. Usualmente la evaluación de un MDT solo comprende la detección de errores verticales, pero es de enfatizarse que la evaluación de la calidad posicional, mediante comparación de coordenadas de los nodos de drenaje enriquece la valoración del MDT, en particular para modelación hidrológica. Por otra parte, puede concluirse que la generación de un MDT mediante proceso fotogramétrico de fotografías aéreas, representa una alternativa de bajo costo y buena calidad frente a procedimientos más sofisticados, como un vuelo especial Lidar, que no obstante su precisión, pueden tener un error considerablemente más elevado e incluso triplicar el costo en la generación de un MDT con características y resultados similares al obtenido en este trabajo. Por lo que se refiere a economía en trabajo de campo, se deduce que en ambos casos se requiere de trabajo de campo exhaustivo para la validación de la información generada por el sensor.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló durante la estancia del primer autor como estudiante de verano en la UACJ Cuauhtémoc. Se agradecen los apoyos brindados por CONACYT y la Academia Mexicana de Ciencias, en el marco del XXV Verano de la Investigación Científica (2015); y los apoyos del Programa PROFAPI, otorgados por la Universidad Autónoma de Sinaloa.

REFERENCIAS

- Carlisle, B. H. (2005). Modelling the Spatial Distribution of DEM Error. *Transactions in GIS*, 9(4), 521–540. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2005.00233.x>
- Czubski, K., Kozak, J., & Kolecka, N. (2013). Accuracy of SRTM-X and ASTER Elevation Data and its Influence on Topographical and Hydrological Modelling: Case Study of the Pieniny Mts. in Poland. *International Journal of Geoinformatics*, 9(2), 137–144.
- Felícísimo, Á. M. (1994). *Modelos Digitales de Terreno. Introducción y Aplicación en las Ciencias Ambientales*. Recuperado a partir de <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>
- Fisher, P. (1998). Improved Modeling of Elevation Error with Geostatistics. *GeoInformatica*, 2(3), 215–233. <http://doi.org/10.1023/A:1009717704255>
- Galon, C. O., González, M. V., & Pantoja, A. R. (2011). Desarrollo de un SIG para el Análisis de Patrones Espaciales de Incendios en Viviendas. *GeoFocus*, (11), 1–18.
- GIS Tutorial 3: Advanced Workbook*. (2010) (Pap/Cdr/Dv edition). Redlands, CA: Esri Press.
- Hobi, M. L., & Ginzler, C. (2012). Accuracy Assessment of Digital Surface Models Based on WorldView-2 and ADS80 Stereo Remote Sensing Data. *Sensors*, 12(5), 6347–6368. <http://doi.org/10.3390/s120506347>
- Hutchinson, M. F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *International Geographical Union*, 117–133.
- Li, Z. (1991). Effects of Check Points on the Reliability of DTM Accuracy Estimates Obtained from Experimental Tests. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING*, 1333–1340.
- Moran, P. A. P. (1948). The Interpretation of Statistical Maps. *Institute of Statistics, Oxford*, 2, 243–251.
- Pérez Vega, A., & Mas, J. F. (2009). Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. *Investigaciones geográficas*, (69), 53–67.
- Strahler, A. H., & Strahler, A. (2004). *Physical Geography: Science and Systems of the Human Environment*. (3rd Edition, Wiley International Edition edition). John Wiley & Sons.