

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN CON FINES HIDROLÓGICOS A PARTIR DE CURVAS DE NIVEL EN UNA CUENCA DE MONTAÑA: EVALUACIÓN DE FACTORES DE ESCALA

*Digital elevation model for hydrologic purposes from contours in a
mountain basin: scale factors evaluation*

Alex G. Barrios R., Carlos E. Pacheco A. y Juan I. López

Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP), Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes. E-Mail: alexb@ula.ve, carlosa@ula.ve y jlopez@ula.ve.

RESUMEN

Con el propósito de evaluar el efecto de la escala del mapa topográfico, la equidistancia entre curvas de nivel y el tamaño del píxel del modelo raster, en el modelo digital de elevaciones (MDE) generado, incluyendo los parámetros hidrográficos y topográficos que de él se deriven, se construyeron 72 MDE, a partir de planos topográficos previamente escaneados y vectorizados en pantalla, aplicando como técnica de interpolación el método TIN, según la propuesta de Felicísimo (2001).

Se utilizaron planos topográficos a escalas 1:25.000 y 1:100.000 con equidistancias entre curvas de nivel de 20 y 40 m, respectivamente. Se construyeron MDE en ambas escalas, utilizando equidistancias entre curvas de nivel de 40, 80, 120 y 200 m, además de la equidistancia de 20 m para 1:25.000. En cada caso de equidistancia y escala, se elaboraron MDE para distintos tamaños de píxel: 1, 10, 15, 20, 30, 50, 100 y 200 m.

Los resultados muestran MDE con la raíz del error medio cuadrático (REMC) entre 1 y 50 m, obteniéndose una REMC menor a 10 m sólo en los MDE construidos a partir del plano a escala 1:25.000 con equidistancias de 40 m o menos entre curvas de nivel y con 30 m o menos de resolución del píxel. Basado en el criterio REMC, el efecto de la escala fue marcado con todos los tamaños de píxel para equidistancias de 20 a 80 m entre curvas de nivel; con equidistancias de 120 m y 200 m no hubo significativa influencia ni de la escala del mapa ni del tamaño del píxel. En función de los resultados se recomienda usar un tamaño de píxel de 30 m, equidistancia entre curvas de 40 m y escala 1:25.000.

Con base en parámetros hidrográficos, derivados de los MDE construidos, no se obtuvieron marcadas diferencias entre los factores de escala. Las longitudes de drenaje derivadas variaron entre 150 y 178 km, con un coeficiente de variación de 4%. No obstante la aparente similitud de los resultados, el análisis visual de la red de drenaje demuestra que aquellas derivadas con escala 1:25.000, píxel de 30 m o menos y equidistancia de 40 y 20 m son las que mejor se ajustan a los drenajes digitalizados.

Palabras clave: Modelos digitales de elevación (MDE), cuenca de montaña, escala del mapa topográfico, equidistancia entre curvas de nivel, tamaño del píxel.

ABSTRACT

72 DEM (Digital Elevation Model) were constructed in order to assess scale factors effects, including topographic map scale, contour equidistance and raster model resolution (pixel size). DEMs were calculated from contours applying TIN interpolation method and following Felicísimo (2001) procedure. Contours were derived from scanned topographic maps, which were vectorized on screen.

Topographic maps with 1:25.000 and 1:100.000 scale and respectively 20 and 40 m of contour equidistance were used. With both scale DEMs were constructed using 40, 80, 120 y 200 m of contour equidistance. For 1:25.000 scale a DEM additionally was constructed using 20 m contour equidistance. For each equidistance and scale case DEMs were calculated with distinct pixel sizes: 1, 10, 15, 20, 30, 50, 100 y 200 m.

Results showed DEMs with rmse (root mean square error) into 1 to 50 m range. RMSE less than 10 m result only when DEMs were constructed from 1:25.000 topographic map scale, contour equidistance of 40 m or less and pixel resolution of 30 m or less. RMSE-based criteria showed a strong scale effect for all pixel sizes into 20 to 80 m equidistance contours. Neither map scale and pixel resolution meaningfully had effects for 120 y 200 m contour equidistance. According to results it is recommendable to use 30 m pixel size or less, 40 m contour equidistance and 1:25.000 scale topographic map.

Results about hydrographic parameters derived from constructed DEMs drawn no meaningful differences among scale factors. Derived drainage lengths varied from 150 to 178 km, with 4% of coefficient of variation. In spite of the apparent similarity of results a visual detailed analysis of the drainage net were built to prove that the best drainage nets are those derived from 1:25.000 topographic map, 40 m equidistance contour and using pixel resolution of 30 m.

Key words: Digital elevation model (DEM), mountainous watershed, topographic map scale, equidistance contours, pixel size

INTRODUCCIÓN

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) se definen como una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). Aunque la construcción de los MDE puede hacerse mediante técnicas sofisticadas a partir de sensores remotos (fotografías aéreas, imágenes de satélites, imágenes de radar de apertura sintéticas (SAR), entre otras) y sistemas de geoposicionamiento (GPS), la principal fuente de datos sigue siendo el mapa topográfico.

Diversos autores coinciden en que lo fundamental para la construcción de los MDE es la elección de la escala y resolución del píxel (Fairfield et al. 1991; Weidner y Forstner, 1995; Garbreht y Martz, 2000; Longley et al. 1999; Rossiter y Rodríguez, 2001; Mitasova et al. 2000; DIELMO 2002); debido a la importancia que estos factores tuvieron en sus estudios relacionados con el análisis topográfico, la evaluación de tierras, el modelamiento de la erosión y del recurso hídrico. Para construir sus MDE, algunos autores (Weidner y Forstner, 1995 y DIELMO, 2002) eligieron una elevada resolución (tamaño del píxel), escala grande y baja equidistancia entre las curvas de nivel, para obtener resultados precisos y evitar otros inconvenientes. Tal elección implica mayores requerimientos de equipo y tiempo de computación, justificable en terrenos planos debido a la elevada precisión que allí se requiere para determinar las direcciones del flujo de escorrentía. En cuencas hidrográficas de montaña, donde la mayor parte del terreno tiene pendiente elevada, podría esperarse menores exigencias en cuanto a los factores de escala a utilizar, y por tanto menores costos de proyecto. Este estudio, en consecuencia, tiene como objetivo evaluar el efecto de la escala del mapa topográfico, la equidistancia entre curvas de nivel y la resolución de la cobertura raster (tamaño del píxel), en la exactitud de un MDE generado con fines hidrológicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Para la realización del siguiente estudio se seleccionó, por sus características topográficas de montaña, la parte alta de la cuenca del río Mucujún, enmarcada dentro de las coordenadas 8° 44' 02" y 8° 49' 25"

de latitud norte y 70° 57' 48" y 71° 04' 22" de longitud oeste, cubriendo un área de 120 km² (cuadrícula de 10 km x 12 km). Las altitudes varían desde 2660 hasta 4680 msnm, con fuertes pendientes de hasta 72 % en las vertientes, siendo la pendiente media de 38%. El cauce principal, bien entallado formando valles en "V", tiene una pendiente media de 14 %.

Métodos

Los modelos digitales de elevación (MDE) se construyeron a partir de curvas de nivel de mapas topográficos, siguiendo el procedimiento de Felicísimo (2001); que se basa en una interpolación TIN (interpolación lineal mediante red irregular de triángulos) usando el "software" ArcView 3.2 con extensiones "3D-Analyst" y "Spatial Analyst". Pasos previos a la interpolación fueron el "escaneo" de los planos topográficos analógicos, su conversión a imagen digital (formatos TIFF y BMP) y la vectorización de las curvas de nivel, la cual se realizó con el "software" CartaLinx. A partir del archivo vectorial de curvas de nivel se construyen los modelos TIN en ArcView, los cuales se convierten, posteriormente, en modelos con formato raster (rejilla, retícula o "grid") con una resolución o tamaño de celdas (píxel) específica.

En la Figura 1, se ilustra el significado de los factores de escala considerados: escala del mapa topográfico analógico, resolución del modelo raster (tamaño del píxel) y equidistancia entre curvas de nivel. Se utilizaron dos escalas del mapa topográfico: 1:25.000 y 1:100.000, con curvas a equidistancia de 20 m y 40 m, respectivamente. Para cada escala se elaboraron modelos TIN utilizando curvas de nivel a equidistancias de 40, 80, 120 y 200 m, además de un modelo TIN a partir de curvas con equidistancia de 20 m para la escala 1:25.000. Cada modelo TIN se convirtió en diversos modelos raster con resoluciones de 1, 10, 15, 20, 30, 50, 100 y 150 m; obteniéndose de esta forma 72 MDE correspondientes al área de estudio.

El análisis comparativo entre los MDE generados se realizó utilizando dos criterios distintos: raíz del error medio cuadrático (REMC) y red hidrográfica derivada. REMC se define como:

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i')^2}{n}} \quad (1)$$

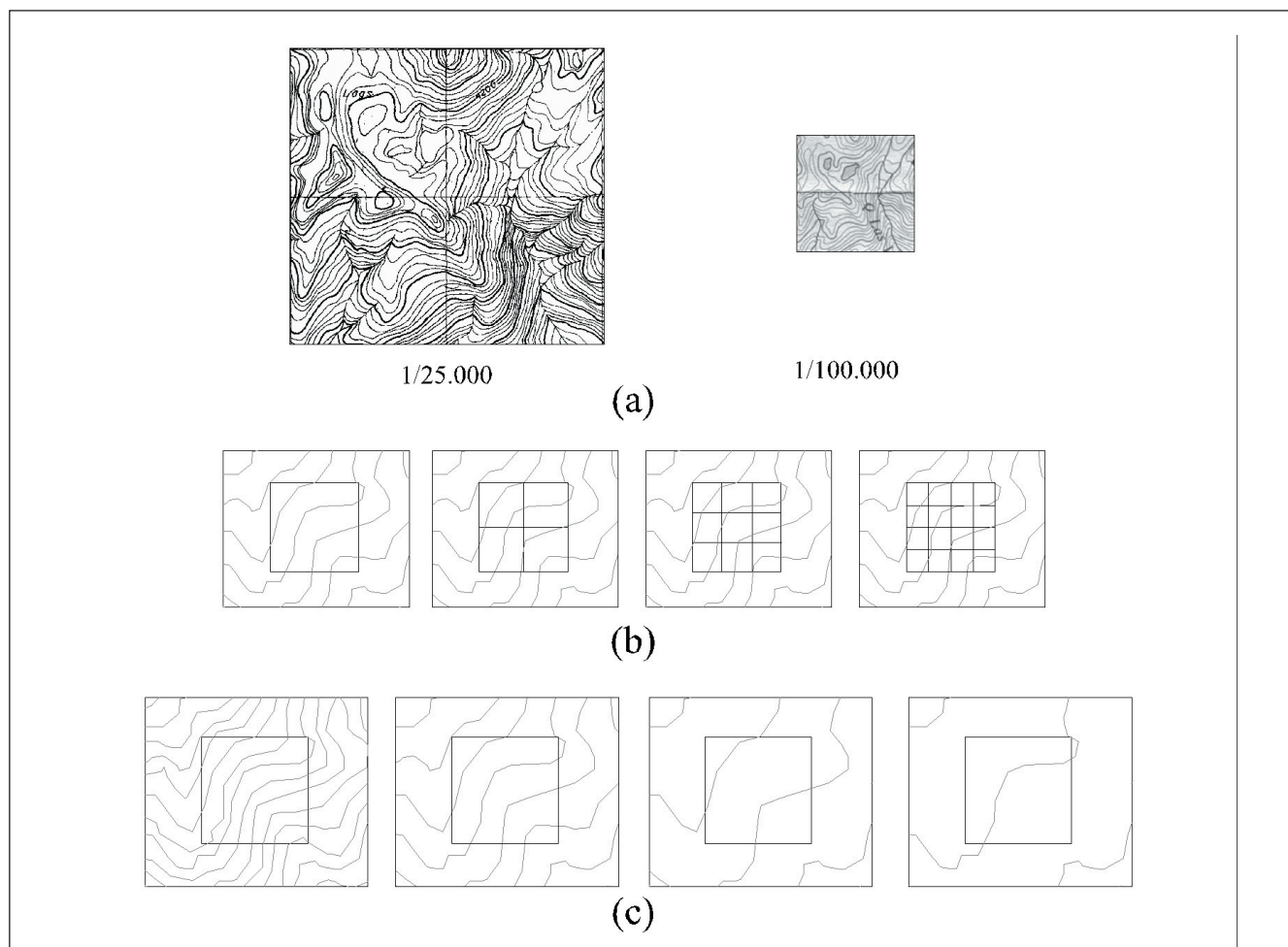


Figura 1. Factores de escala: a. escala del mapa, b. tamaño del píxel y c. equidistancia entre curvas

Z_i , es la cota de un punto i de control, tomada directamente de la curva de nivel; Z'_i , es la cota según el MDE para el mismo punto de control; y n , es el número de puntos de control.

Se seleccionaron 3.710 puntos de control, correspondientes a igual número de vértices de la cobertura vectorial con las curvas de nivel (archivo en formato "shape"). Estos puntos se obtuvieron de forma sistemática, superponiendo sobre la cobertura anterior una cuadrícula de ejes de coordenadas separados 1 km entre sí; los puntos de intersección entre la cuadrícula y las curvas de nivel digitalizadas constituyen los puntos de control Z_i : coordenadas x,y de localización del punto i y cota o valor atributivo correspondiente. Los valores Z'_i , se obtuvieron, a su vez, interceptando los puntos de control (coordenadas x,y) sobre los MDE generados (archivos en formato "grid"). Estas tareas se facilitaron aplicando

"scripts" públicos disponibles en Internet (Herbold, 2003; Buja, 2003). En la Figura 2 se ilustra el procedimiento de modelaje cartográfico seguido.

El segundo criterio, red hidrográfica derivada, se refiere a la generación automática de la red de drenaje correspondiente a cada MDE elaborado y su comparación con la red hidrográfica del mapa topográfico, previamente vectorizada. Para la delimitación automática de los drenajes se aplicó el programa CRWR-PrePro (Olivera, 1999), el cual es una extensión ArcView de carácter público que se basa en el algoritmo común D8 (ocho puntos vecinos). Se aplicaron tres indicadores: comparación visual, longitud total de drenajes y desviación o separación entre la red generada y la digitalizada. Este último indicador se determinó midiendo la superficie de los polígonos que se forman entre el drenaje digitalizado y el drenaje generado.

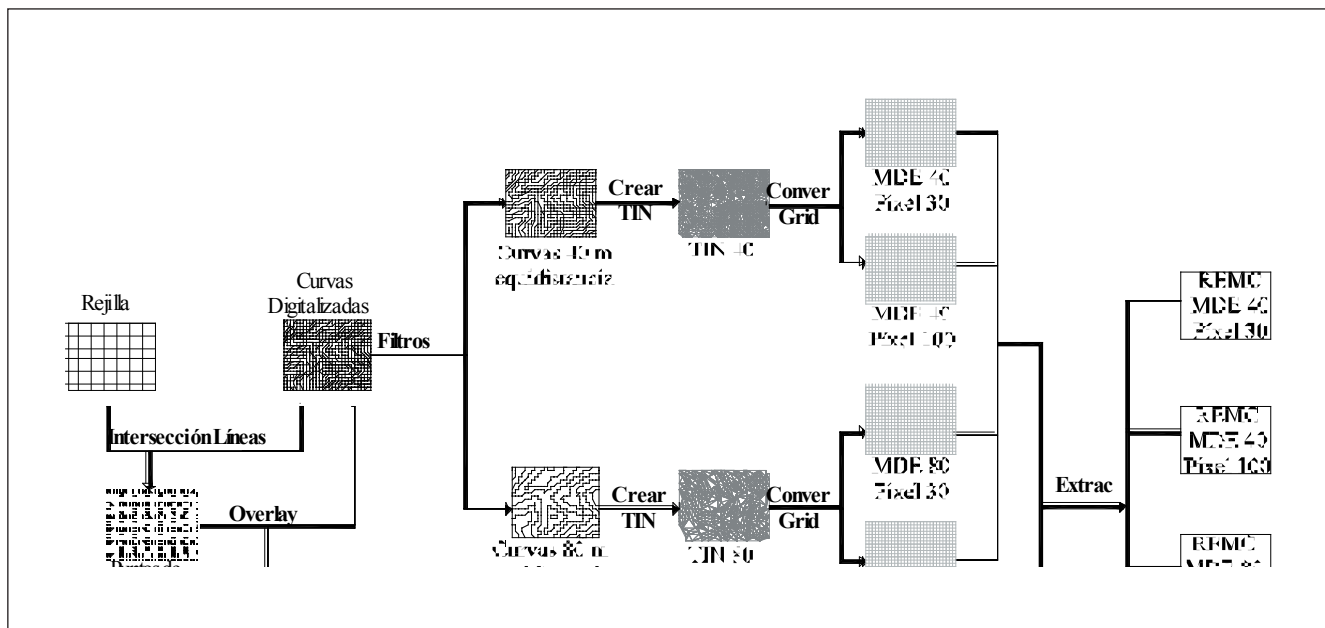


Figura 2. Esquema metodológico del modelaje cartográfico en SIG

Materiales y equipos

Cartas cartográficas del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB) a escalas 1/100.000 (hojas 5942 y 6042) y 1/25.000, (hojas 5942-II-NE, 5942-II-SE, 6042-III-NO y 6042-III-SO).

Software: Cartalinx, AutoCad Map 2000i, CAD Overlay 2000i, EZYsurf, ArcView 3.2, las rutinas (“scripts”) “intersect lines”, “Compiled Theme Tools” (Herbold, 2003), “gridstack” (Buja, 2003), y el programa (extensión ArcView) CRWR-PrePro (Olivera, 1999).

Hardware: PC Pentium IV Intel de 2 GHz, bajo Windows 2000, con 1 Gb en RAM y 80 Gb en disco duro.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 3 se muestran las REMC para los 72 MDE elaborados, observándose un rango de variación para el conjunto entre 1 y 50 m de REMC. Errores menores a 10 m se produjeron sólo cuando los factores de escala evaluados representaban mayor detalle: escala 1:25.000, 20 y 40 m de equidistancia entre curva de nivel, y tamaño de píxel menor o igual a 30 m.

El marcado efecto de cada factor de escala se sintetiza en la Figura 4. En primer lugar, se observa, en todos los casos, que a escala 1:25.000 las

REMC son menores a sus homólogos de 1:100.000. La magnitud de las diferencias depende del valor de los otros factores de escala: equidistancia entre curvas de nivel y resolución del píxel. Así, en la Figuras 4(a) y 4(b) puede observarse como, para ambas escalas, la REMC se incrementa con la equidistancia entre curvas de nivel; pero también, se aprecia como la diferencia entre las escalas 1:25.000 y 1:100.000 se reducen a medida que incrementa la equidistancia, pudiéndose decir que para 200 m de equidistancia las REMC son prácticamente iguales. Por otra parte, en las Figuras 4(c) y 4(d) se observa, en ambas escalas, que a mayor tamaño del píxel el REMC incrementa, pero que existe un umbral de 30 m de resolución, a partir del cual este efecto es notable; para tamaños de píxel inferiores a 30 m, las diferencias no son significativas.

Con base al criterio REMC, los resultados permiten recomendar, sin que se pierda precisión, un tamaño de píxel de 30 m, equidistancia entre curvas de nivel de 40 m y escala 1:25.000, para la elaboración de un MDE en cuencas montañosas.

En las Figuras 5 y 6 se presentan los resultados relacionados con las redes hidrográficas generadas a partir de los MDE construidos. Al contrario de lo ocurrido con el criterio REMC, se observa una reducida influencia de los factores de escala, tanto en la longitud de la red hidrográfica como en su localización; pese a que los patrones de cambio no están

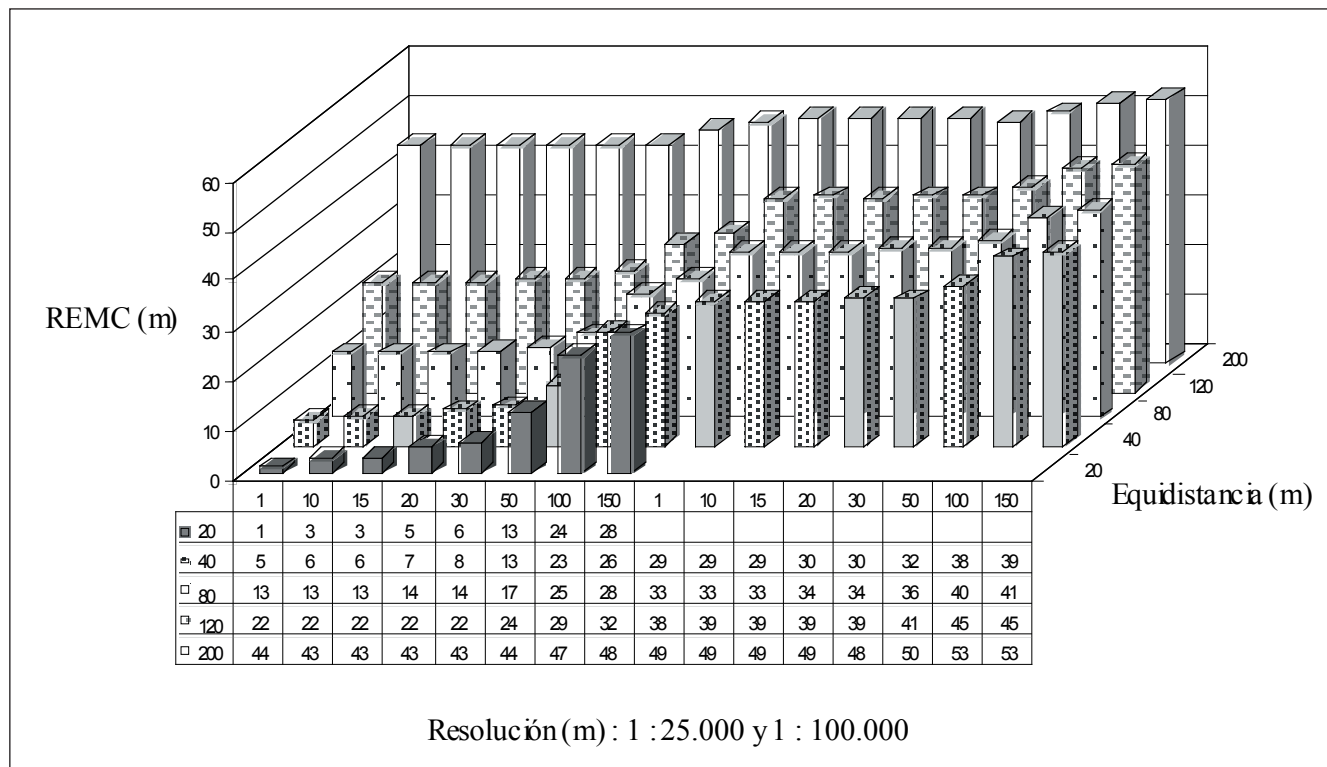


Figura 3. Resultados: raíz de los errores medios cuadráticos de los MDE producidos

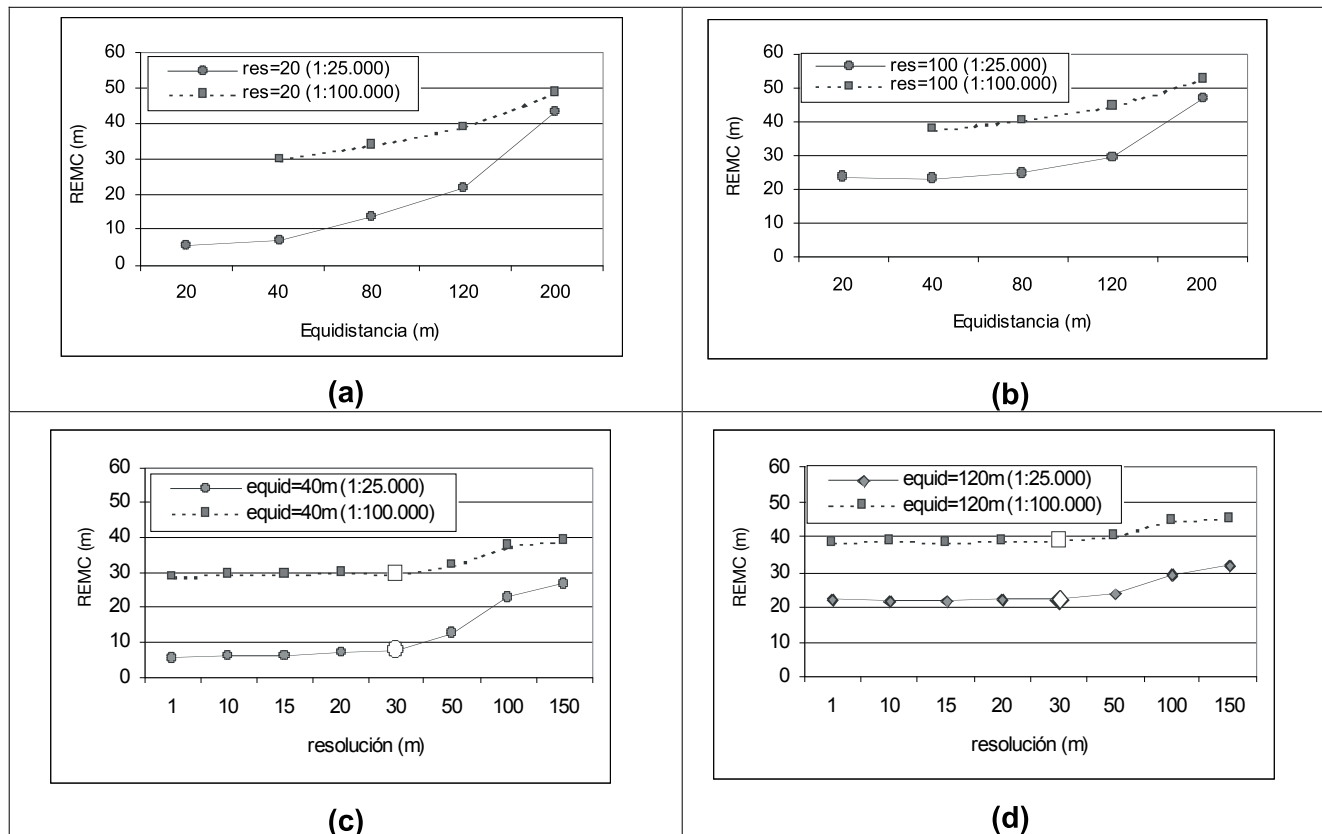


Figura 4. Análisis de resultados: (a) y (b) efecto de equidistancia y escala para dos resoluciones de píxel seleccionadas. (c) y (d) efecto del tamaño del píxel y escala del mapa para dos equidistancias seleccionadas

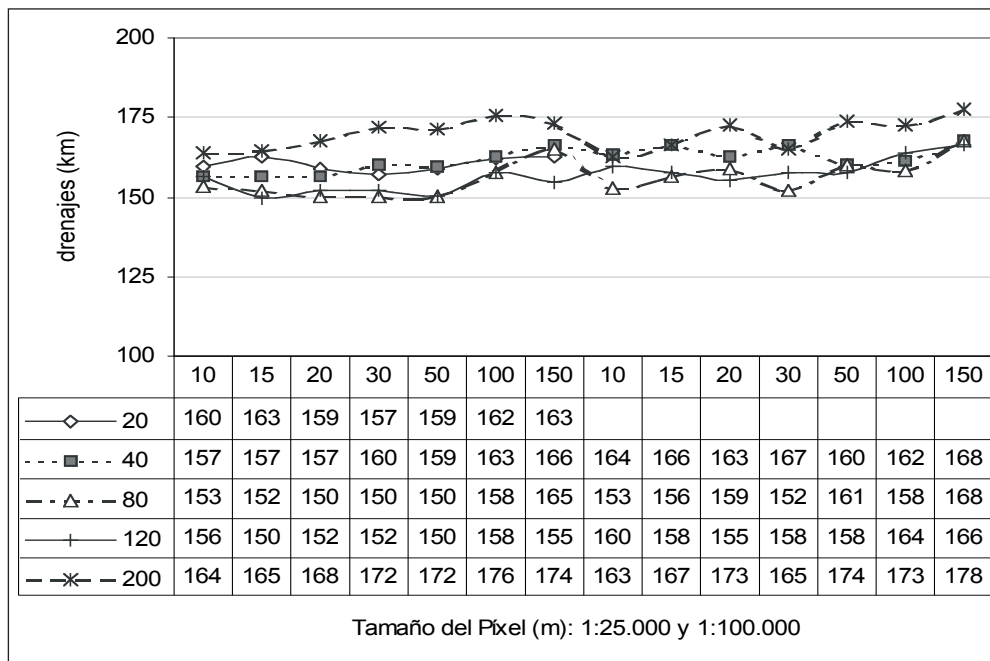


Figura 5. Longitud de drenajes, para un umbral de 250 ha

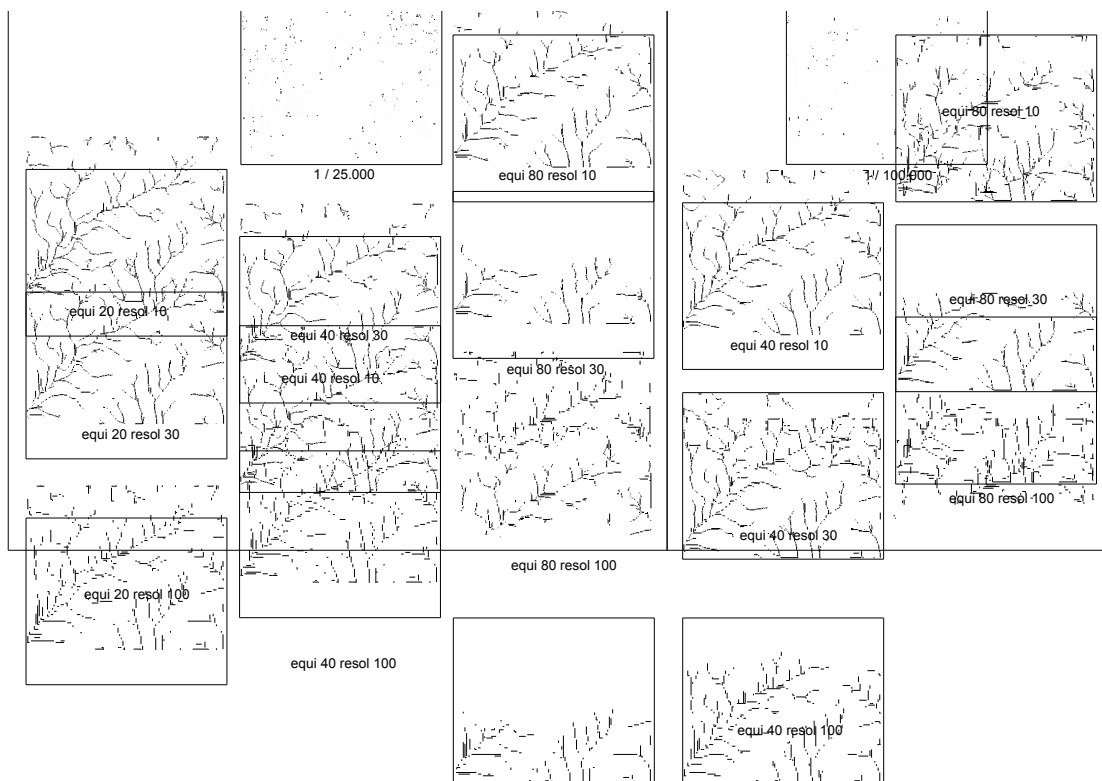


Figura 6. Drenajes digitalizados: 1/25.000 y 1/100.000; drenajes generados: de MDE con equidistancia 20, 40 y 80 m, tamaño de píxel 10, 30 y 100 m a escala 1/25.000 y de MDE con equidistancia 40 y 80 m, tamaño de píxel 10, 30 y 100 y a escala 1/100.000

bien definido. La longitud de la red varió entre 150 y 178 km de longitud, con un coeficiente de variación (CV) de 4%. En la Figura 6 se muestra la comparación visual entre los cauces vectorizados y la red de drenaje generada.

Una medida de la desviación o desplazamiento de la red generada en comparación con la vectorizada se presenta en la Figura 7 y en la Figura 8 los resultados derivados usando este criterio. En la Figura 8(a) se aprecia la escasa influencia de la escala del mapa, y como incrementa la medida de la desviación entre redes con el tamaño del píxel. Por su parte, en la Figura 8(b) se observa que la desviación también crece al ser mayor la equidistancia entre curvas de nivel utilizada durante la construcción del MDE.

Aunque las redes hidrográficas generadas, como se muestran en la Figura 6, lucen muy similares entre sí, un análisis detallado y exhaustivo con las redes digitalizadas a las diferentes escalas y las generadas mediante MDE con distintos factores de escala, (Figura 9), muestra la generación incorrecta de algunos tributarios cuando se emplean equidistancias y resoluciones mínimas. De donde se desprende que, las redes de drenajes generadas mediante métodos computacionales no son idénticas a las obtenidas de los mapas originales, sin embargo, se pueden recomendar los siguientes valores para reproducir la red de drenaje: escala 1:25.000 o 1:100.000 con píxeles de 30 m y equidistancia entre curvas de nivel de 40 m.



Figura 7. Comparación visual de la red hidrográfica generada (negra delgada) con la digitalizada del mapa original (gris gruesa) a partir de un MDE a escala 1:25.000, equidistancia 40 m y tamaño de píxel 30 m

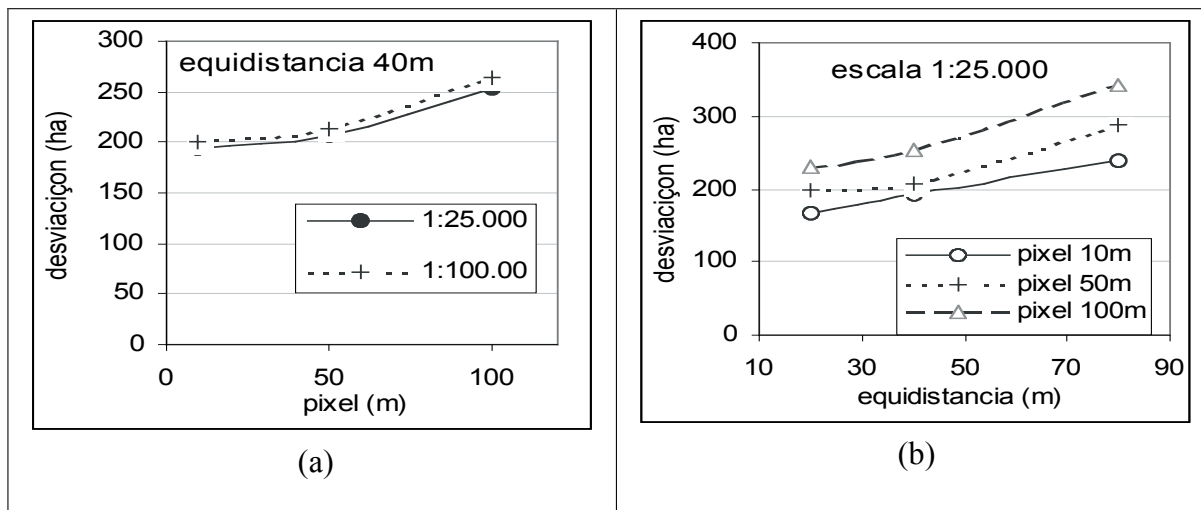


Figura 8. Efecto de escala sobre la red hidrográfica generada: (a) escala del mapa topográfico. (b) equidistancia entre curvas de nivel y tamaño del píxel

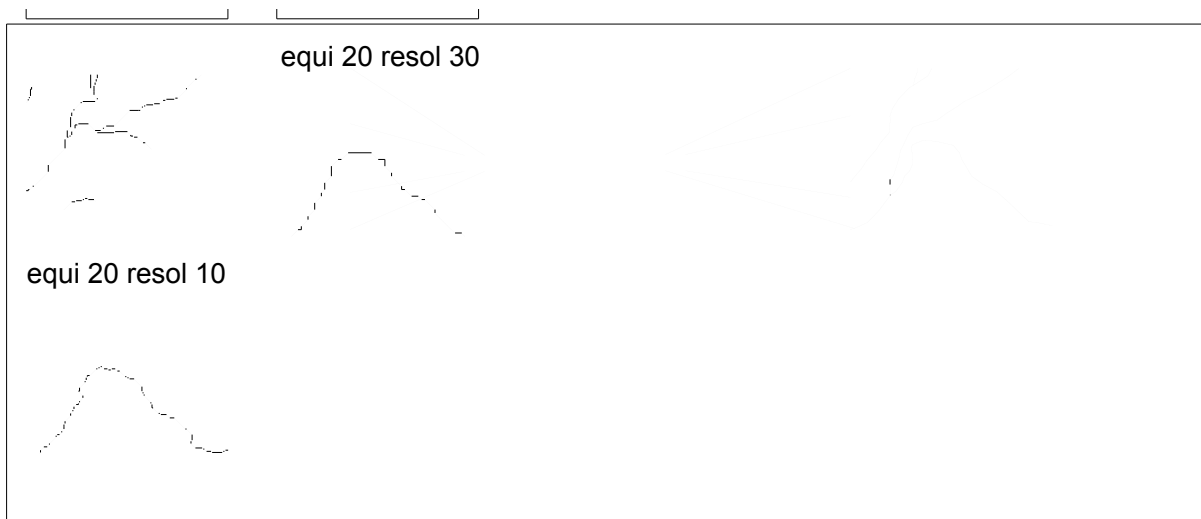


Figura 9. Drenajes digitalizados : 1/25.000 y 1/100.000; drenajes generados: de MDE con equidistancia 20 m, tamaño de píxel 10 y 30 m a escala 1/25.000 y de MDE con equidistancia 40 m, tamaño de píxel 10 y 30 m y a escala 1/100.000

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUJA, K. 2003. "Gridstak" (Extensión para ArcView) [en línea] 2003. Dirección URL: <http://www.arcscript.home.com>. [Consulta: 22 Jul.2003].
- DIELMO.2002. Modelos digitales del terreno de calidad en WWW. DIELMO. COM. [en línea] 2002. Dirección URL: <http://www.dielmo.com>. [Consulta: 22 Jul.2003].
- FAIRFIELD, J. and LEYMARIE, P. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*. 24 (5): 709 – 717.
- FELICÍSIMO, A. 1994. Modelos digitales de terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Ediciones Pentalfa. Oviedo – España.
- FELICÍSIMO, A. 2001. Modelos digitales del terreno. [en línea] 2001. Dirección URL: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>. [Consulta: 06 Jul.2002].
- GARBRECHT, B. and MARTZ, L. 2000. Digital elevation model issues in water resources modelling. [en línea] 2000. Dirección URL: <http://www.esri.com/library/usercont/proc99/papers/pap866/p866.htm>. [Consulta: 06 Jul.2001].

- HERBOLD, C. 2003. "Compiled theme tools" (Extensión para ArcView). [en línea] 2003. Dirección URL: <http://www.arcsript.home.com>. [Consulta: 22 Jul.2003].
- LONGLEY, P., GOODCHILD, M., MAGUIRE, D. and RHIND, D. 1999. Geographical information systems. John Wiley and Sons, INC. Vol 1. USA.
- MITASOVA, H., MITAS, L., BROWN, W. and JOHNSTON, D. 2000. Terrain modelling and soil erosion simulation final report. [en línea]. 2000. Dirección URL: <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/reports/cer/01/finlreport/report01/defaulti.html>. [Consulta: 15 Mar. 2003].
- OLIVERA, F. 1999. CRWR-PrePro : An Arc View pre-processor for hydrologic, hydraulic and environmental modeling. [en línea] 1999. Dirección URL: <http://www.ce.utexas.edu/~prof/olivera/prepo/prepo.html>. [Consulta: 22 Jul.2003].
- ROSSITER, D. y RODRÍGUEZ, F. 2001. Construcción de modelos digitales de terreno para la evaluación de tierras. [en línea] 2001. Dirección URL: <http://www.Redpav-fpolar.info.ve/venesuel/v021/v021a070.html>. [Consulta: 20 Jul.2002].
- WEIDNER, V. and FORSTHER, W. 1995. Towards automatic building extraction from high-resolution digital models. *Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. 50(04): 38 – 49.