

Determinación de la precisión de DEMs generados con puntos digitalizados a partir de cartografía existente: relación con el algoritmo utilizado *

Accuracy determination for DEMs generated from digitized points from existing mapping: relationship with the algorithm used

Héctor G. Rosatto ¹

Guido Botta ^{1,3}

Miriam Presutti ²

Laura Pruzzo ¹

Daniel Laureda ¹

Alfredo Tolón-Becerra ⁵

Luis Rodríguez Plaza ⁴

Gustavo Villalba ¹

Gabriela Calvo ¹

Bárbara Davanzo ¹

María B. Miranda ¹

Maia Meyer ¹

Mabel Iñigo ¹

Originales: Recepción: 15/04/2010 - Aceptación: 10/12/2010

RESUMEN

La información básica sobre el relieve de cuencas hidrográficas, mediante metodologías analítico-descriptivas permite contar con los parámetros físicos necesarios para el estudio de los recursos naturales tales como manejo integrado de cuencas, impacto ambiental, degradación de suelos, deforestación, conservación de los recursos hídricos, entre otros. Todos estos procesos ligados a una fuerte componente espacial permiten el uso de sistemas de información geográfica. Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) y sus derivados son un componente relevante de estas fuentes de datos. En este trabajo se planteó evaluar

ABSTRACT

Basic information about watershed relief, drawn from analytical-descriptive methodologies, allows for the physical parameters necessary to the study of natural resources, such as watershed integrated management, environmental impact, soil degradation, deforestation, water resource conservation, among others. All these processes linked to a strong spatial component allow the use of geographic information systems. Digital elevation models (DEMs) and their derivatives are an important component of these data sources. In this work we evaluated DEMs generated from indirect source data (digitized points from existing contour maps) to

* Un resumen expandido del presente trabajo fue presentado en el XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina, 2010.

1 Dpto. de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra, Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453. C1417DSE. rosatto@agro.uba.ar

2 Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Avda. 60 y 119. s/n. (1900) La Plata, Argentina.

3 Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa. Ruta 35. Km 334. (L6300) Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

4 Dpto. de Ingeniería Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias. UNCUYO. Alte. Brown 500. Chacras de Coria. Mendoza. Argentina. M5528AHB.

5 Área de Proyectos de Ingeniería. Universidad de Almería. Carretera Sacramento s/n. La Cañada de San Urbano. (04120) Almería, España.

los DEMs, generados por captura indirecta de datos fuente, (puntos digitalizados sobre un plano, en formato papel, con curvas de nivel) para determinar si su calidad altimétrica varía con la resolución espacial del mismo (tamaño de grilla). Asimismo se evaluó la posible existencia de alguna interacción entre el software utilizado y los tamaños de grilla, que podría influir sobre la calidad altimétrica del DEM. Se concluyó que la resolución espacial afecta la calidad altimétrica del DEM. Se constató, asimismo, que es posible encontrar un tamaño de grilla ideal en cuanto a calidad altimétrica y peso informático del modelo digital de elevaciones generado. Respecto de la existencia de una interacción entre el tamaño de grilla y el software, que pudieran afectar la calidad de los modelos obtenidos en función de la metodología de adquisición de datos fuente, se demostró que existe esta posibilidad cuando la base de datos se genera a partir de puntos digitalizados.

determine whether elevation accuracy varies with DEM spatial resolution (grid size). We also assessed the possible existence of some interaction between grid size and the software used that could influence the altimetric quality of the DEM. It was concluded that spatial resolution affects DEM quality. We also found that it is possible to find an ideal grid size in terms of the altimetric accuracy and computer weight size of the generated DEM. Regarding the existence of an interaction between grid size and the software used, which could affect the quality of models obtained based on the methodology of source data acquisition, we found that this possibility does exist when the database is generated from digitized points.

Keywords

DEM • digitalized • ideal grid size • grid-software interaction

Palabras clave

DEM • digitalización • tamaño grilla ideal • interacción grilla-software

INTRODUCCIÓN

La topografía tiene una notable influencia sobre numerosas variables que intervienen en la dinámica de los ecosistemas. El clima a escala local, los procesos geomorfológicos y edáficos, el movimiento y la acción de agua y, consecuentemente, los numerosos procesos biológicos condicionados por ellos, se encuentran estrechamente asociados a la forma y altitud de la superficie del terreno en los que se desarrollan. Los mapas topográficos (curvas de nivel) han sido, prácticamente en exclusiva hasta los años 70, las herramientas para valorar esta influencia. Pero la interpretación y en definitiva la utilidad de estos mapas, muy ágil para la percepción visual de la superficie topográfica, resultaba limitada para realizar análisis cuantitativos. La informática abrió una posibilidad nueva: describir la altitud de la superficie del terreno o cualquier otra característica del mismo, en forma numérica (6). Es decir, se modela la realidad.

La construcción de un DEM implica una interpolación realizada con puntos de alturas de la superficie del terreno (cotas) o a partir de bases de datos topográficas existentes. El tamaño de la grilla y el tipo de algoritmo interpolador utilizados para la creación del DEM, ejercen una considerable influencia en el DEM obtenido y, por consiguiente, también en todos los atributos derivados de él (14).

Un DEM es una simplificación de la realidad y por lo tanto inevitablemente contendrá errores, los cuales no son considerados equivocaciones y no pueden ser eliminados trabajando muy cuidadosamente; lo mejor que puede esperarse es que sean pequeños y tener una estimación fiable de su magnitud (18) y utilizando las grillas de interpolación más adecuadas para cada caso (11).

Los usuarios finales de los modelos digitales son los que deciden si el error contenido en un DEM es adecuado o no para la aplicación deseada; por ejemplo: si se deseara evaluar el riesgo de inundación en una zona determinada probablemente se requerirá mayor precisión en el modelo que si se está evaluando riesgo de incendio. Por esta razón es necesario conocer dichos errores.

Hipótesis

1. La resolución espacial o el tamaño de celda afectan la calidad altimétrica del DEM.
2. Se plantea un supuesto de existencia de alguna interacción entre el software utilizado y los tamaños de grilla, que podría influir sobre la calidad altimétrica del DEM.

Objetivo

Evaluar la calidad altimétrica de los DEMs generados a partir de puntos digitalizados y con la utilización de distintos algoritmos en su construcción (incluyendo variantes de resolución espacial o tamaño de celda).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionó para el estudio un sector de un establecimiento sito en la localidad de Rawson (Latitud: 34:39:46S (-34.6627) y Longitud: 60:06:28W (-60.1077), partido de Chivilcoy, Provincia de Buenos Aires, Argentina. La ciudad está ubicada a 2 km hacia el oeste de la ruta provincial 51 y el área de ensayo se encuentra 14 km al sur de Rawson, comprendida entre las siguientes coordenadas planas Gauss Krügger (campo Inchauspe):

Vértices	Coordenada "X"	Coordenada "Y"
Extremo Norte	6160550	5491485
Extremo Este	6159150	5492850
Extremo Sur	6157100	5490850
Extremo Oeste	6158415	5489480

La superficie total del área de ensayo es de 5.185.922 m² (518,5 ha). Comprende 11 lotes del establecimiento. El relieve zonal es plano a suavemente ondulado, con numerosas depresiones en las zonas plano cóncavas de la topografía. El establecimiento se encuentra hacia el norte del río Salado, e integra desde el punto de vista geomorfológico la Pampa Deprimida.

El sector de estudio correspondería a una loma alta plana (respecto del relieve general de la zona) con una gran cantidad de cubetas de deflación u hoyas topográficas, que cuando se colmatan, por excesos hídricos, se unen entre sí contribuyendo a un anegamiento en manto del área.

Metodología

Se utilizó una metodología indirecta de captura de datos fuente para generar la base de datos: Digitalización de la documentación analógica (plano con curvas de nivel: figura 1, pág. 4) en forma manual y generación de una base de datos de puntos acotados.

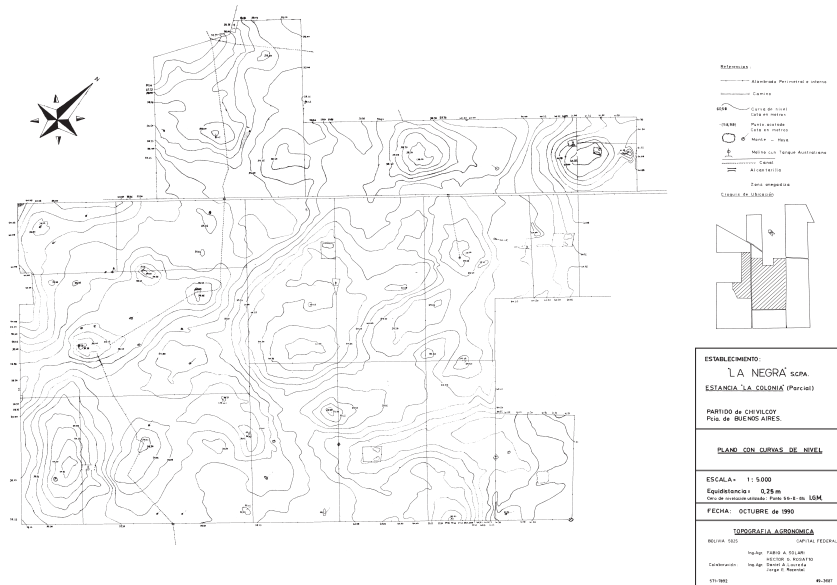


Figura 1. Plano con curvas de nivel - Equidistancia de 0,25 m.
Figure 1. Map with contour lines - Equidistance of 0,25 m.

La base resultante fue de 9.259 puntos (figura 2).

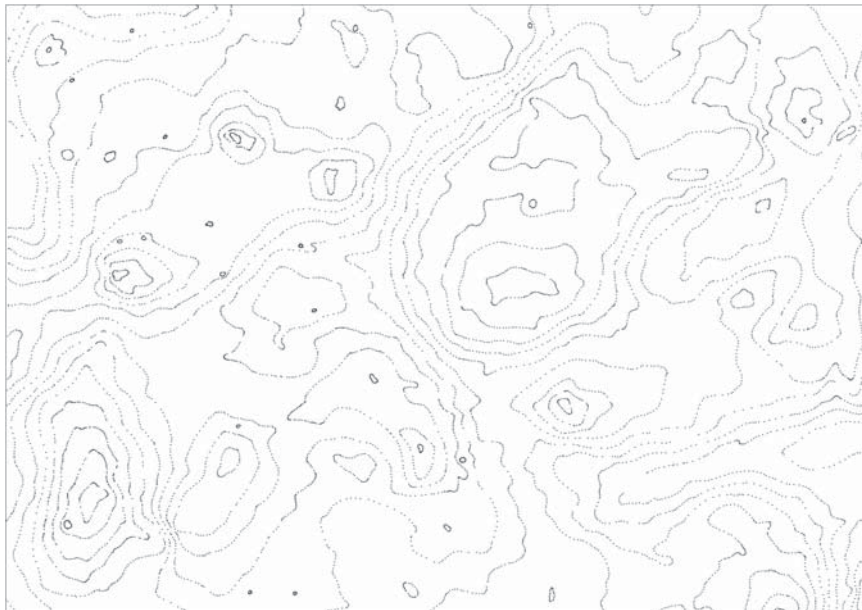


Figura 2. Imagen de la distribución de los puntos digitalizados.
Figure 2. Picture of the distribution of digitalized points.

Con estos datos se generaron los modelos digitales de elevación. Los softwares utilizados fueron, PCI - Módulo OrthoEngine (provisto por el Centro de Investigación y Aplicación a la Teledetección de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires) y el ArcView - Módulo Spatial Analyst (provisto por la Cátedra de Topografía de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires).

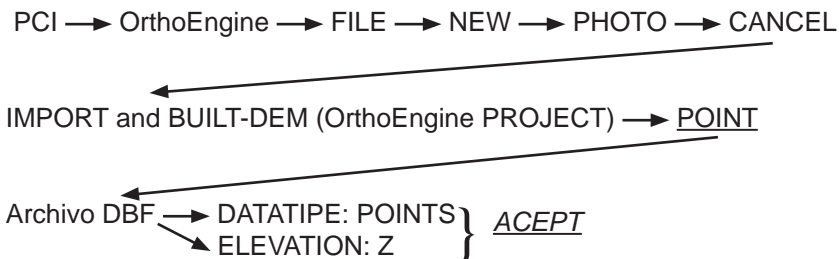
La elección de los softwares mencionados se realizó en base a que los mismos son los de utilización más ampliamente mencionada por la bibliografía, tanto científica como tecnológica, por lo que se considera que los resultados obtenidos pueden ser de impacto directo en extensión o transferencia tecnológica.

Un DEM debe ser un banco de pruebas. En este modelo tienen que estar sintetizados todos aquellos elementos que tienen una incidencia representativa en el medio, pero si éste es muy riguroso, los requerimientos de almacenamiento de información y los procesos de análisis se pueden ver seriamente comprometidos. En el otro extremo, una interpretación de la realidad demasiado somera, puede pasar por alto distintos aspectos que sean trascendentes (8).

En función de lo expuesto también se seleccionaron distintos tamaños de grilla o celda, a fin de evaluar el tamaño de grilla, que como mencionan Sørensen and Seibert (16), cumpla con la condición de tener una alta calidad altimétrica y un tamaño o "peso" informático que permita su utilización sin grandes requerimientos de almacenamiento o procesamiento.

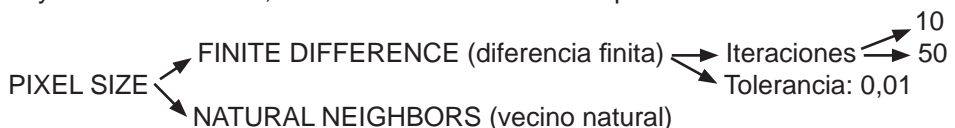
Programa utilizado: PCI - Módulo OrthoEngine

Con PCI - Módulo OrthoEngine, utilizando como datos fuente los puntos acotados obtenidos en forma indirecta a partir de digitalización, se emplearon para generar los DEMs los métodos de interpolación: Finite Difference (diferencia finita) con 10 y 50 iteraciones y Natural Neighbors (vecino natural), según el siguiente esquema:



Luego se seleccionó el nombre y el lugar donde se guardó el DEM construido (DEFINE OUTPUT DEM) y a continuación se seleccionó el tamaño de grilla: PIXEL SIZE.

Se utilizaron los siguientes tamaños de Grilla: 5 m - 10 m - 20 m - 30 m - 40 m - 50 m y 90 m. Finalmente, se definió el método de interpolación:



Iteración

Repetición de una secuencia de instrucciones o eventos, en este caso de interpolaciones. Se utilizaron dos números de iteraciones: 10 y 50.

Tolerancia

Se decidió utilizar una tolerancia equivalente a la precisión con que se relevaron los datos a campo para que el suavizado (*smooth*) fuera equivalente.

Finite Difference

En este método, primero los datos acotados (el valor "z"), se colocan posicionalmente en la grilla *raster* (de acuerdo con su "x e y"), en un segundo paso, interpola a partir del algoritmo de transformación de distancia, que estima los valores de cotas de las celdas equidistantes desde la ubicación de las celdas ya posicionadas en la primera operación; luego el algoritmo a partir del número de iteraciones, suaviza el modelo (DEM).

Es importante mencionar que durante la iteración, los valores de las celdas ubicadas en el primer paso no se modifican, mientras que los valores de las celdas interpoladas se basan en los valores de las celdas adyacentes.

Se recomienda para archivos que contienen puntos uniformemente distribuidos, ya que es una técnica simple, que procesa el DEM mucho más rápido y se ajusta mejor a conjuntos grandes de datos de entrada.

Natural Neighbors

Este método sólo sirve para generar un DEM desde puntos. El algoritmo Natural Neighbors construye círculos mediante tres puntos basado en los triángulos de Delaunay.

Calcula los valores de cota de la celda utilizando todos los puntos que permitan formar el menor número de grandes círculos posibles.

Dentro de cada círculo los valores interpolados son influenciados por los tres puntos que forman el triángulo Delaunay y por todos los círculos que se superponen o solapan con dicho círculo.

Programa utilizado: ArcView - Módulo Spatial Analyst

Con Arc-View - Módulo Spatial Analyst, utilizando como datos fuente los puntos acotados obtenidos en forma indirecta a partir de digitalización, se emplearon para generar los DEMs los métodos: Inverse Distance Weighted (ponderación inversa de la distancia) con radio de búsqueda variable (6 puntos vecinos) y con radio de búsqueda fijo (80 m); y Spline, con las variantes Regularized y Tension.

IDW: INVERSE DISTANCE WEIGHTED (ponderación inversa de la distancia)

El método IDW combina "vecinos" asumiendo la existencia de un cambio gradual de las superficies con una tendencia. Supone que el valor del atributo "Z" en una

posición donde el valor del atributo no es conocido es un promedio de los valores de sus vecinos pero donde los más cercanos tienen más peso que los más alejados.

Esto lo puede realizar con un radio de búsqueda variable o fijo. En cuanto al "poder", un "Power" alto le da más peso a los puntos cercanos, creando una superficie más detallada, pero menos suavizada. En un "poder" bajo toman más influencia los puntos de aquellas áreas más lejanas que rodean al dato ingresado, dando como resultado superficies más suavizadas.

Radio de búsqueda variable

El número representa los puntos usados en la interpolación del valor de la celda (pixel). Esto hace variable la búsqueda del radio para cada pixel interpolado, dependiendo de cómo tenga que "estirarse" para alcanzar el número especificado dentro de los puntos ingresados como unidad básica de información.

1.- IDW → Neighbors (número de vecinos): 6
→ Power: 2

Radio de búsqueda fijo

El radio del círculo usado para buscar datos es igual para cada celda interpolada.

2.- IDW → Fixed radius: 80 m
→ Power: 2

SPLINE

El método estima valores usando una función matemática que reduce al mínimo la curvatura superficial total, dando por resultado una superficie lo más "lisa" posible que pasa exactamente a través de los puntos cargados como datos de entrada. Hay dos métodos: Regularized y Tension.

Regularized

Crea una superficie suave, de manera gradual cambiando la superficie con los valores que pueden estar fuera de la gama de datos de la muestra.

1. SP → weight: 2 (a peso más alto, superficie más suave)
→ n° points: 6 (más puntos, mayor influencia de los puntos lejanos: sup. suave)

Tension

Suaviza la rigidez de la superficie según el carácter del fenómeno modelado. Esto crea la superficie lisa con valores estrechamente obligados por la gama de datos de la muestra.

2. SP → weight: 2 (a menor peso, superficie más suave)
→ n° points: 6 (más puntos, mayor influencia de los puntos lejanos: sup. suave)

Se utilizaron los siguientes tamaños de grilla: 5 m - 10 m - 20 m - 30 m - 40 m - 50 m y 90 m.

Se construyeron 21 DEMs con PCI y 16 DEMs con ArcView. La cantidad de modelos generados con ArcView fue menor porque:

- en el método IDW con radio fijo de 80 m, por fuera de ese radio, aparecen celdas sin datos, por eso no se realizó el DEM de 90 m de grilla.
- en el método SPLINE, no generó el modelo para grillas superiores a los 10 m. Es probable que a partir de ese tamaño de celda existan varios puntos con cota diferente dentro de una celda, y como el SPLINE está obligado a respetar la cota de origen, al encontrar más de una no sigue interpolando.

La cuantificación del error en un DEM se lleva a cabo comparando un conjunto de valores reales de elevación con los estimados en el modelo, así el error de altitud en un punto "d" es definido como la diferencia entre la altitud del punto en el modelo "z" y su valor real "z'" (3).

En la obtención de estos puntos de control en orden de preferencia se encuentran primeros aquellos determinados a campo (19).

Se efectuó en el terreno un relevamiento de puntos distribuidos homogéneamente (representativos de la heterogeneidad del relieve presente en el área de estudio), mediante nivelación geométrica de tercer orden (con precisión del centímetro) con cierre altimétrico. Estos puntos se ubicaron por coordenadas polares a partir de estaciones de coordenadas conocidas para poder contar con toda la información en el mismo sistema de ubicación espacial que los DEMs generados.

Una vez cerrados en tolerancia y compensados se procedió al cálculo de la cota de dichos puntos testigos a fin de poder establecer una serie de datos apareados en la evaluación de la calidad altimétrica de los modelos.

En cuanto a la cantidad y distribución de los puntos testigo o de control, El USGS (19), recomienda un mínimo de 28 puntos: 20 internos y 8 en los límites o bordes del DEM evaluado. Aquí se ubicaron y midieron 50 puntos testigos, aproximadamente 15 en los bordes y el resto internos (figura 3, pág. 9).

Estos puntos de control (dada la calidad altimétrica y planimétrica de los mismos respecto del material analizado), se consideran "verdaderos" y sin error (10).

En la evaluación de la exactitud de los modelos de elevación se utilizan estos puntos de control considerados como "verdad de campo" los cuales son comparados con los generados por el modelo en esa misma posición.

Se obtiene entonces la diferencia entre las dos alturas, es decir, el error. Con estos errores se computan valores estadísticos como el RMSE (*Root Mean Squared Error*) que son usados en la evaluación de la precisión de los DEMs.

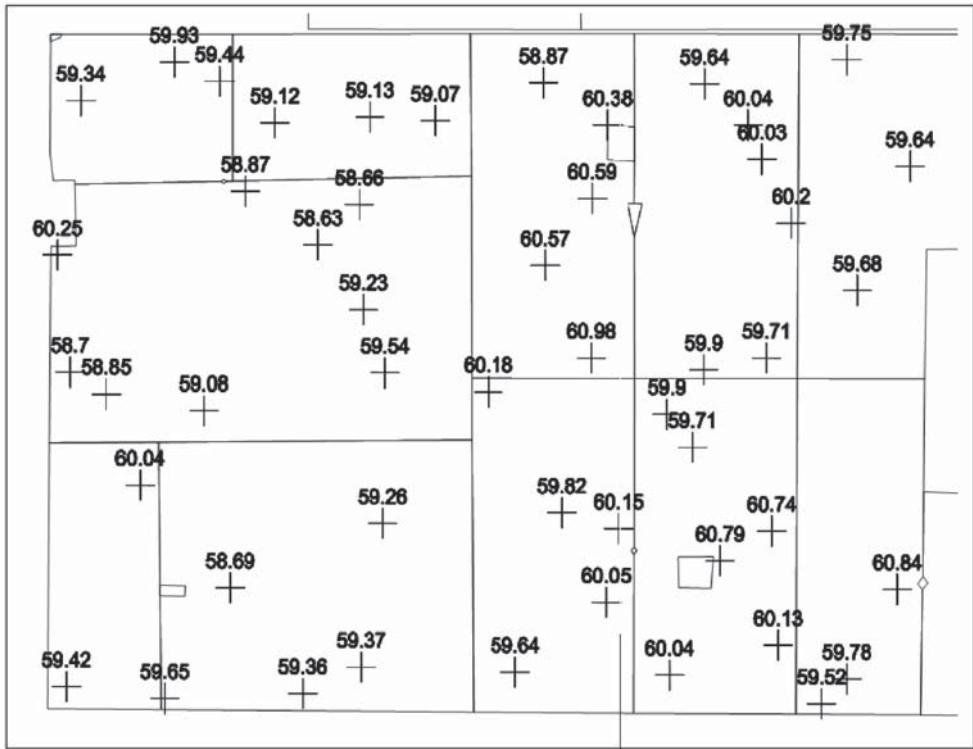


Figura 3. Puntos testigo distribuidos en el área de estudio.

Figure 3. Witness points distributed in the study area.

La medida más ampliamente utilizada (5, 19, 20), para reportar la exactitud en un DEM es una medida de dispersión, el RMSE (Root Mean Square Error). Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_j)^2}{N}}$$

donde:

y_i = valor de altura del modelo

y_j = altura real

N = número de pares de valores modelados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la generación de los DEMs, como ya se mencionó, se construyeron 21 DEMs con PCI y 16 DEMs con ArcView:

DEMS construidos con PCI - Módulo OrthoEngine

Se obtuvieron en total 21 DEMs como resultado de la metodología ya descripta. Los mismos se denominaron: 5df10it - 5df50it - 5nn - 10df10it - 10df50it - 10nn - 20df10it - 20df50it - 20nn - 30df10it - 30df50it - 30nn - 40df10it - 40df50it - 40nn - 50df10it - 50df50it - 50nn - 90df10it - 90df50it - 90nn

df10it: Finite difference con 10 iteraciones
df50it: Finite difference con 50 iteraciones

nn: Natural Neighbors
5 a 90: tamaños de grilla en m

Ejemplo de la denominación utilizada

5df10it: Tamaño de grilla: 5 m, Finite difference con 10 iteraciones

Algunos ejemplos de los DEMs obtenidos se detallan en las figuras 4 y 5.

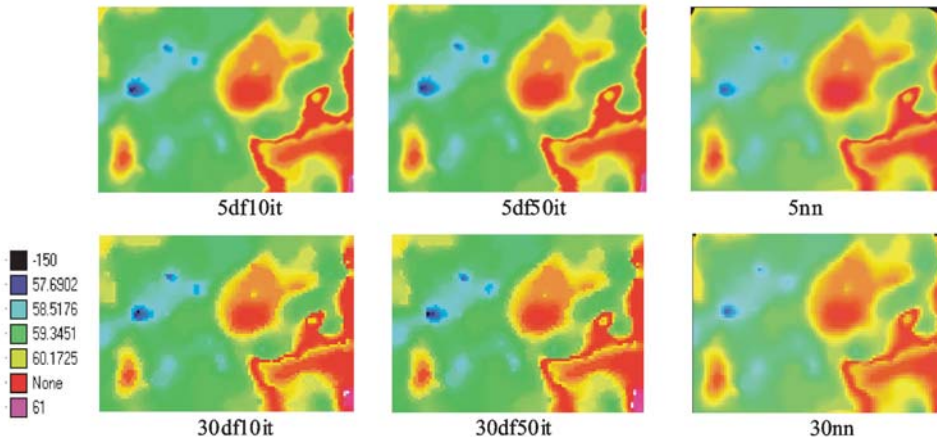


Figura 4. Ejemplos de DEMs (PCI) con tamaños de Grilla de 5 y 30 metros.

Figure 4. Examples of DEMs (PCI) with 5 and 30 meters grid sizes.

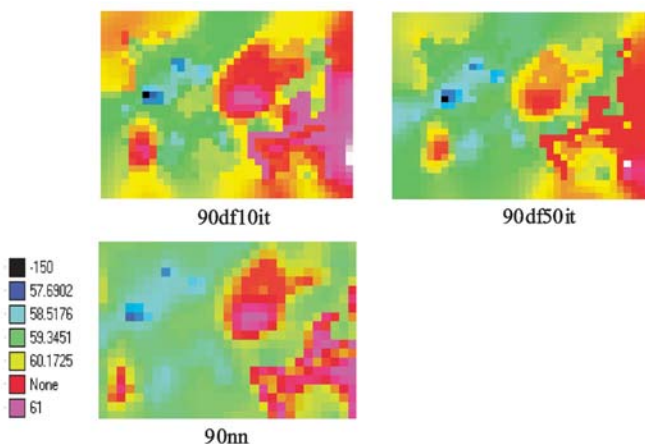


Figura 5. Ejemplos de DEMs (PCI) con tamaño de Grilla de 90 metros.

Figure 5. Examples of DEMs (PCI) with 90 meters grid size.

DEM's construidos con ArcView - Módulo Spatial Analyst

Se obtuvieron en total 16 DEMs como resultado de la metodología anteriormente descrita. Los mismos se denominaron: 5_IDWp2-n6 - 5_IDWp2-rf80 - 5_SPTenw2-p6 - 5_SPRegw2_p6 - 10_IDWp2-n6 - 10_IDWp2-rf80 - 10_SPTenw2-p6 - 10_SPRegw2_p6 - 20_IDWp2-n6 - 20_IDWp2-rf80 - 30_IDWp2-n6 - 30_IDWp2-rf80 - 40_IDWp2-n6 - 40_IDWp2-rf80 - 50_IDWp2-n6 - 50_IDWp2-rf80

IDW: Inverse Distance Weighted
 p: power
 n: neighbors
 rf: fixed radius
 SP: Spline

Ten: tension (type)
 Reg: regularized (type)
 w: weight
 p: points
 5 a 90: tamaños de grilla en m

Ej. de la denominación utilizada

- 5_IDWp2-n6: Tamaño de grilla: 5 m, Inverse Distance Weighted, power:2 - neighbours:6
- 5_IDWp2-rf80: grilla: 5 m, Inverse Distance Weighted, power:2 - radio fijado:80
- 5_SPTenw2-p6: Tamaño de grilla: 5 m, Spline, tipo: Tension, weight:2 - n° puntos:6
- 5_SPRegw2-p6: Tamaño de grilla: 5 m, Spline, tipo: Regularized, weight:2 - n° puntos:6

Algunos ejemplos de los DEMs obtenidos se detallan en las figuras 6 y 7.

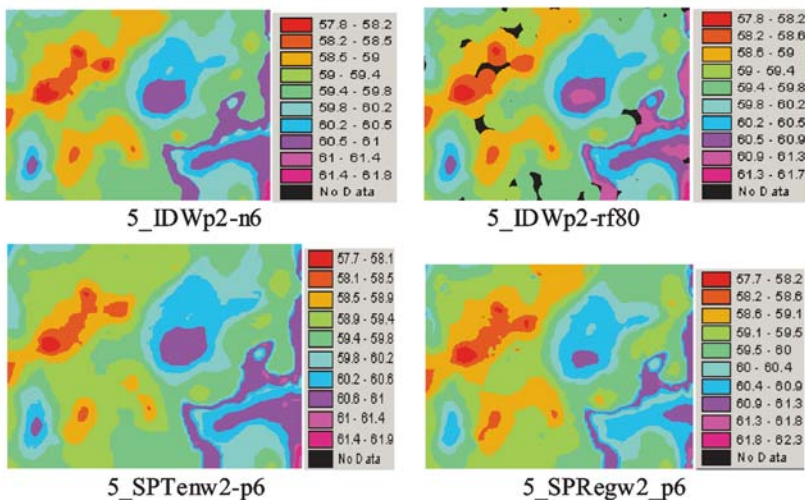


Figura 6. Ejemplos de DEMs (Arc View) con tamaño de Grilla de 5 metros.
Figure 6. Examples of DEMs (Arc View) with 5 meters grid size.

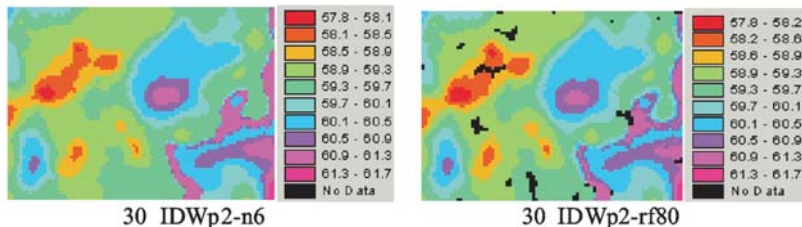


Figura 7. Ejemplos de DEMs (Arc View) con tamaño de Grilla de 30 metros.
Figure 7. Examples of DEMs (Arc View) with 30 meters grid size.

Como se mencionó en la metodología, la cuantificación del error en un DEM se lleva a cabo comparando un conjunto de valores reales de elevación con los estimados en el modelo. En cada uno de los modelos construidos se procedió a determinar la diferencia (error) entre la altitud del punto en el modelo "z" y su valor real "z'".

Luego, con estos errores, se determinó el RMSE, pero previo al cálculo del mismo se revisaron las series de datos apareados, descartándose todos aquellos que notoriamente representaban equivocaciones derivadas quizás de "artefactos" del DEM o "blancos" (celdas sin cotas) que pudieron surgir durante la construcción de los modelos.

Con los datos de RMSE calculados se determinó la tolerancia para cada algoritmo, considerando que según la teoría de errores, la tolerancia (para un intervalo de confianza del 99 %) es igual al triplo del RMSE (10).

Todos aquellos errores obtenidos de comparar la cota del testigo con la cota obtenida del DEM que superaron dicha tolerancia, se descartaron, se eliminaron de la serie, procediéndose luego a determinar un nuevo RMSE (7).

Este procedimiento se repitió hasta que ningún valor superó la tolerancia, asegurando de esa manera que todos los datos de la serie pertenecen a la población de errores y no son equivocaciones (que no son contempladas por la teoría de errores).

Los resultados de RMSE obtenidos se presentan en la siguiente tabla y en la figura 8 (pág. 13).

Tabla 1. Determinación del RMSE de los DEMs.

Table 1. Determination of the RMSE of DEMs.

Puntos digitalizados sobre curvas de nivel								
Algoritmo	Soft	RMSE (m)	Algoritmo	Soft	RMSE (m)	Algoritmo	Soft	RMSE (m)
5df10it	PCI	0,07	40df10it	PCI	0,11	10_IDWp2-n6	AV	0,10
5df50it	PCI	0,07	40df50it	PCI	0,08	10_IDWp2-rf80	AV	0,10
5nn	PCI	0,06	40nn	PCI	0,11	10_SPTenw2-p6	AV	0,08
10df10it	PCI	0,07	50df10it	PCI	0,11	10_SPRegw2_p6	AV	0,09
10df50it	PCI	0,07	50df50it	PCI	0,11	20_IDWp2-n6	AV	0,11
10nn	PCI	0,07	50nn	PCI	0,15	20_IDWp2-rf80	AV	0,09
20df10it	PCI	0,07	90df10it	PCI	0,16	30_IDWp2-n6	AV	0,11
20df50it	PCI	0,07	90df50it	PCI	0,16	30_IDWp2-rf80	AV	0,10
20nn	PCI	0,08	90nn	PCI	0,16	40_IDWp2-n6	AV	0,10
30df10it	PCI	0,08	5_IDWp2-n6	AV	0,10	40_IDWp2-rf80	AV	0,12
30df50it	PCI	0,10	5_IDWp2-rf80	AV	0,09	50_IDWp2-n6	AV	0,11
30nn	PCI	0,09	5_SPTenw2-p6	AV	0,09	50_IDWp2-rf80	AV	0,10
			5_SPRegw2_p6	AV	0,09			

De acuerdo con los resultados expuestos en la tabla 1 y la clasificación propuesta por Schiewe (13), en la cual clasifica la "exactitud" de los DEMs basada en la calidad altimétrica de los mismos (determinada ésta, a partir del valor de RMSE calculado),

se puede apreciar que en el caso de los DEMs construidos a partir de la metodología descrita (puntos digitalizados), 18 presentan un RMSE inferior a los 10 cm, por lo que se los clasifica como de muy alta exactitud (49%), mientras que los 19 restantes son de alta exactitud (51%).

Cabe señalar que en la información base utilizada para la digitalización (plano con curvas de nivel en formato papel), la equidistancia (intervalo vertical entre dos curvas de nivel sucesivas) fue de 0,25 m. Con mayores valores de equidistancia, serían esperables aumentos del RMSE y disminución en la exactitud de los modelos generados. Los menores tamaños de grilla presentan los mejores índices de "calidad altimétrica" (en valor absoluto). Esto es coincidente con lo mencionado por otros autores tales como Cheng *et al.* (1, 2), Salvador-Blanes *et al.* (12), Fua *et al.* (4), Sørensen y Seibert (16) y Taconet y Ciarletti (17).

Otro aspecto destacado que se aprecia en las figuras anteriores es la existencia de un tamaño de grilla ideal, tal como proponen Morillo Barragán *et al.* (8), que reúne el mejor RMSE posible, compatible con el menor "peso" informático. La zona aproximada en la cual comienza esa tendencia se encuentra marcada con una elipse azul en la figura 8. Esta posibilidad de determinación gráfica del tamaño de grilla "ideal" ha sido mencionada también por Sindayiheburu *et al.* (15).

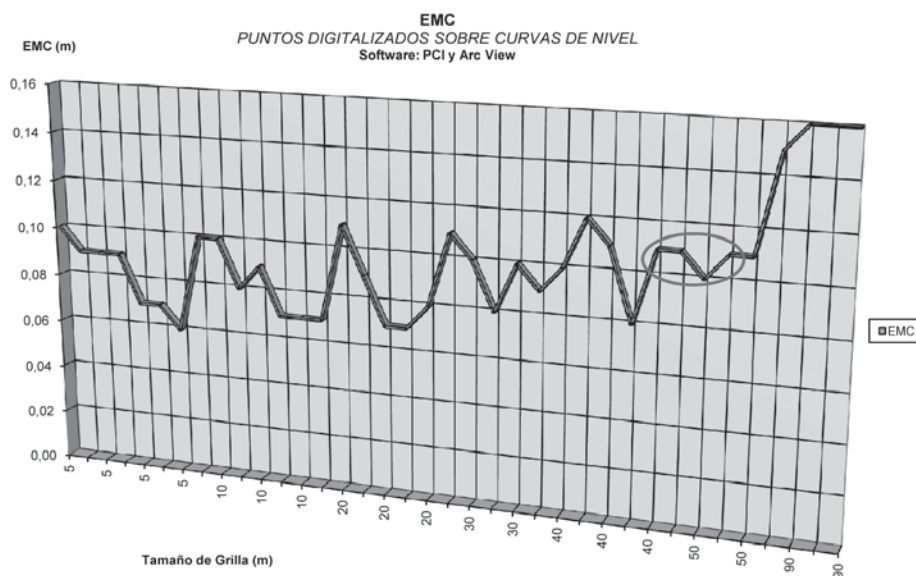


Figura 8. Distribución del RMSE según el tamaño de grilla - Puntos Digitalizados.
Figure 8. Distribution of the RMSE related to the grid sizes - Digitalized Points.

Consideraciones finales

En vista de los resultados obtenidos, y para verificar la segunda hipótesis: de un supuesto de existencia de alguna relación entre el software utilizado y los tamaños de grilla, que podría influir sobre el RMSE, se propuso, para determinarlo, utilizar un análisis de regresión lineal (9).

Subyacentes a este análisis son los supuestos con respecto a los términos de error aleatorio. Éstos deben ser independientes, de distribución normal e igual varianza.

La aplicación del análisis resultó significativo $r^2: 0.71$ ($p < 0,0001$) evidenciando un efecto relevante del tamaño de grilla ($p < 0,001$), y la presencia de algunos valores muy alejados, con residuales *estudentizados* mayores a 2,5 (figura 9).

Model: MODEL1					
Dependent Variable: RMSE					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	0.01721	0.01721	84.14	<.0001
Error	35	0.00716	0.00020454		
Corrected Total	36	0.02437			
Root MSE		0.01430	R-Square	0.7062	
Dependent Mean		0.09811	Adj R-Sq	0.6978	
Coeff Var		14.57744			
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	1	0.07177	0.00371	19.34	<.0001
grilla	1	0.00090650	0.00009883	9.17	<.0001

Figura 9. Modelo de regresión.

Figure 9. Regression model.

Para casos como éstos y para lograr la mejor explicación de la relación de regresión a través del modelo más adecuado, se propuso utilizar una transformación de la variable RMSE, siendo la logarítmica una de las más aconsejadas.

Por lo tanto se probó un nuevo modelo (model 2) con el logaritmo de RMSE como variable dependiente, y el tamaño de grilla y el software (variable indicadora) como variables "regresoras", incluyéndose asimismo un término de interacción entre el tamaño de grilla y el software (figura 10, pág. 15).

Como aparecen algunos valores alejados, se propuso un segundo análisis con la transformación logarítmica de RMSE, y con los mismos "regresores" que en el primero.

MODEL2
Te REG Procedure
Model: MODEL1
Dependent Variable: log

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	1.89982	0.63327	60.20	<.0001
Error	33	0.34712	0.01052		
Corrected Total	36	2.24694			

Root MSE	0.10256	R-Square	0.8455
Dependent Mean	-2.35305	Adj R-Sq	0.8315
Coeff Var	-4.35862		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t	Type I SS
Intercept	1	-2.76042	0.03676	-75.09	<.0001	204.86379
grilla	1	0.01092	0.00083325	13.11	<.0001	1.44742
dummy	1	0.35765	0.05634	6.35	<.0001	0.29337
int	1	-0.00704	0.00181	-3.89	0.0005	0.15903

Figura 10. Modelo de regresión con transformación logarítmica.
Figure 10. Regression model with logarithmic transformation.

El resultado muestra que este modelo mejora mucho el poder explicativo de las variables sobre los RMSE, el r^2 , de 0,7 pasa a más de 0,8 y resultan muy significativos el efecto del tamaño de grilla, así como el del software y la interacción entre el software y el tamaño de grilla.

Este último resultado quizás se deba a que los algoritmos matemáticos y métodos utilizados para la interpolación (en la generación del DEM), realizan el "suavizado" (*smooth*) de la superficie (relieve) respetando los datos fuente, aunque por supuesto lo hacen de distintas maneras. La distribución de los puntos de la base de datos utilizada no es uniforme, por ello, según la forma en que realizan el suavizado (que está ligada al software utilizado), presentan distinto resultado.

CONCLUSIONES

Si se considera que, como primera hipótesis de trabajo, se planteó que la resolución espacial o el tamaño de celda afectan la calidad altimétrica del DEM, cabe señalar que la misma ha sido validada, y que además es posible encontrar un tamaño de grilla ideal en cuanto a calidad altimétrica y peso informático del modelo digital de elevaciones generado.

Respecto de la existencia de una interacción entre el tamaño de grilla y el software, que pudiera afectar la calidad de los modelos obtenidos en función de la metodología de adquisición de datos fuente, se demostró que existe esta posibilidad cuando la base de datos se genera a partir de puntos digitalizados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cheng, Hong; Yongqiu Wu; Xueyong Zou; Ha Si; Yanzhi Zhao; Dagang Liu, Xinglin Yue. (2006). Study of ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau. *Soil & Tillage Research*. 90, 184-193.
2. _____; Zou, X.; Wu, Y.; Zhanga, Ch.; Zhenga, O.; Jiang, Z. 2007. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China. *Soil & Tillage Research*. 94, 4-14.
3. Felicísimo, Á. M. 1994. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(4): 29-33.
4. Fua, G.; Chena, S.; Mc Cool, D. K. 2006. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS. *Soil & Tillage Research*. 85, 38-49.
5. Li, Z. 1991. Effects of check points on the reliability of DTM accuracy estimates obtained from experimental tests. In: *Phtogrametric Engineering & Remote Sensing*, 47(10): 1333-1340.
6. Marquínez, J. 1994. Presentación. En: *Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Dirección Regional de Recursos Naturales, Principado de Asturias. Oviedo.
7. Mingo, R. 2000. *Cálculo Numérico. Curso correspondiente al ciclo básico de la Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata.
8. Morillo Barragán, J.; Pozo Baselga, J.; Pérez Preciado, F.; Rodríguez Gordillo, M. C.; Rebollo Castillo, F. J. 2002. Análisis de calidad de un modelo digital de elevaciones generado con distintas técnicas de interpolación. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España. 12 p.
9. Neter, W.; Wasserman, W.; Kutner, M. H. 1994. *Applied Linear Statistical Models: Regression, analysis of variance and experimental designs*. Ed.: Richard D. Irwin, EE.UU. 1181 p.
10. Rosatto, H. G.; Solari, F. A. 2002. *Errores de Medición. Guía de estudios* - Editada por el CE-FAUBA, 7 p.
11. _____; Presutti, M.; Botta, G.; Laureda, D.; Villalba, G.; Rodríguez Plaza, L.; Atencio, A.; Caso, C.; Gamboa, P.; Meyer, M. 2009. Modelos digitales de elevación generados por captura directa e indirecta de datos fuente: evaluación de su calidad. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina*. 41(2): 73-84.
12. Salvador-Blanes, S.; Cornu, S.; Couturier, A.; King, D.; Macaire, J. J. 2006. Morphological and geochemical properties of soil accumulated in hedge-induced terraces in the Massif Central, France. *Soil & Tillage Research*. 85. 62-77.
13. Schiewe, J. 2000. Combining geometrical and semantical image information for the improvement of Digital Elevation Models. In: Buchroithner, M.F. (Ed.): *A Decade of Trans-European Remote Sensing cooperation, Proceedings of the 20th EARSEL-Symposium*, A. A. Balkema Publishers: 175:180.

14. Schoorl, J. M.; Sonneveld, M. P. W.; Veldkamp, A. 2000. Three-dimensional landscape process modeling: the effect of DEM resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*. 25, 1025-1034.
15. Sindayihebura, A.; Van Meirvenne, M.; Nsabimana; S. 2006. Comparison of methods for deriving a digital elevation model from contours and modelling of the Associated Uncertainty. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Edited by M. Caetano and M. Painho. Lisboa, Instituto Geográfico Português. p. 181-190.
16. Sørensen, R.; Seibert, J. 2007. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. *Journal of Hydrology*. 347, 79-89.
17. Taconet, O.; Ciarletti, V. 2007. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. *Soil & Tillage Research*. 93, 64-76.
18. Taylor, J. 1997. *An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements*. University Science Books, Sausalito, CA. EE. UU. 327 p.
19. United States Geological Survey (USGS). 1998. *Standards for Digital Elevation Models*. 410 p. National Mapping Program-EE. UU.
20. Yang, Xiaojun; Thomas, Hodler. 2000. Visual and statistical comparisons of surface modeling techniques for point-based environmental data. *Cartography and Geographic Information Science*. 27(2): 165-175.

