

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES A PARTIR DE DIFERENTES TÉCNICAS DE INTERPOLACIÓN COMO APOYO AL MODELO DE ORDENAMIENTO AMBIENTAL. ESTUDIO DE CASO: MUNICIPIO GÜIRA DE MELENA, PROVINCIA DE ARTEMISA. CUBA.

Autores: Jorge Olivera Acosta¹, Zarith Pérez Pérez¹, Miguel Ribot Guzmán¹, Tatiana Geller Roffe¹, Ibis Batista Pérez², Diuvanys Molina Aguirre².

- 1- Instituto de Geografía Tropical, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente.
- 2- Instituto de Planificación Física, Güira de Melena.

RESUMEN:

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en función de la distribución de los datos de altura (cotas e Isolíneas) y de la aplicación correcta de los algoritmos matemáticos utilizados para la interpolación espacial, puede representar las irregularidades del relieve de la forma más próxima posible a la realidad objetiva de una determinada localidad, garantizando una buena representación espacial de las alturas del terreno y por consiguiente una buena estimación de los parámetros implícitos (alturas) y de la información derivada de este, entre los que podemos mencionar, por su **aplicación en la esfera ambiental**, los parámetros hidromorfológicos (índice topográfico de humedad, flujo acumulado, curvaturas, red de drenaje, entre otros) y aquellos de carácter morfométrico que constituyen parámetros importantes en la definición de unidades homogéneas (inclinación de las pendientes, pendiente compleja, Índice de posición topográfica, índice de rugosidad, entre otros), los cuales pueden constituir verdaderas herramientas de análisis para llegar a establecer índices e indicadores en la determinación de los potenciales y las limitaciones para el desarrollo de una determinada actividad durante la implementación del modelo de ordenamiento ambiental a escala local y regional.

El objetivo fundamental del trabajo es determinar la calidad del MDE para el municipio Güira de Melena, una de las áreas de estudio del proyecto BASAL (Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local), a partir del empleo de diferentes técnicas de interpolación, analizando cuál de ellas realiza el mejor ajuste y representa con mayor fidelidad las irregularidades del terreno en dicho municipio. Se aplicaron como técnicas de interpolación los siguientes algoritmos: Mínima Curvatura, Vecino Natural, Kriging, y Triangulación, lográndose como resultado definir el modelo digital generado de mejor ajuste y de mayor precisión con respecto a la información inicial.

Palabras Claves: Modelos Digitales de elevación, MDE, NN, Interpolación, Kriging, Triangulación.

INTRODUCCIÓN

Conceptualmente, un Modelo Digital de Elevaciones es una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). A partir de un MDE se pueden describir una serie de parámetros que permiten analizar y caracterizar el relieve. Esto es posible debido a que los procesos de la Geodinámica externa modelan la forma de las superficies sobre las que actúan (Marina. V. 2002).

Las diferentes disciplinas que integran las Ciencias de la Tierra, utiliza como datos básicos para sus investigaciones, informaciones de variables y parámetros, asociadas al relieve, entre los cuales podemos mencionar, por su uso frecuente, la inclinación de la pendiente y su orientación en el terreno, la rugosidad y la disección vertical, entre otros. Además de la información derivada del MDE se obtienen otros parámetros de gran utilidad en la hidrología, entre los que se pueden mencionar por su importancia, la red de drenaje por órdenes, la delimitación de la línea divisoria de las aguas (cuencas fluviales), las curvaturas del relieve, el flujo acumulado, etc. También es relevante la obtención a partir de un MDE de otros indicadores de gran aplicación en la esfera ambiental tales como, el Índice topográfico de humedad, la insolación, el índice de transporte de sedimentos, el índice de potencia de cause, el índice de posición topográfica entre otros. Muchos de estos índices también se emplean para el estudio de algunos procesos que generan riesgos naturales, por eso es muy importante contar con un modelo digital de elevaciones como apoyo a los trabajos de ordenamiento de territorios.

La obtención de un MDE es el punto de partida en los territorios para la delimitación de las grandes unidades morfodinámicas a partir de la clasificación del relieve por pisos altitudinales, los cuales conforman los límites de las unidades homogéneas de integración (unidades ambientales), sin ellas es imposible subdividir el territorio para su manejo.

El objetivo fundamental del trabajo es determinar la calidad del MDE para el municipio Güira de Melena, una de las áreas de estudio del proyecto BASAL (Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local), a partir del empleo de diferentes técnicas de interpolación, analizando cuál de ellas realiza el mejor ajuste y representa con mayor fidelidad las irregularidades del terreno en dicho municipio. Se aplicaron como técnicas de interpolación los siguientes algoritmos: Mínima Curvatura, Vecino Natural, Kriging, y Triangulación, lográndose como resultado definir el modelo digital generado de mejor ajuste y de mayor precisión con respecto a la información inicial.

Los modelos digitales de elevación (MDE) cumplen con la condición de que la información de la realidad que representan está codificada en cifras, siendo esta su principal ventaja, lo que posibilita el procesamiento automatizado de la información sobre un sistema de Información geográfica (SIG) y facilita la posterior modelación de otras variables que dependen en gran medida de la existencia de un MDE preciso y fiable.

El conocimiento detallado del relieve ha sido y es una importante prioridad para diversas disciplinas relacionadas con el medio geográfico, de ahí la importancia que tiene el hecho de poder representar numéricamente lo más fiel posible a la realidad, la superficie del terreno (Vega, 2000). Especialmente en las Ciencias de la Tierra los datos topográficos son

fundamentales ya que el relieve condiciona el desarrollo de muchos procesos geológicos y geomorfológicos.

Área de estudio.

El área de estudio para el desarrollo del trabajo comprende el municipio Güira de Melena y zonas aledañas de la provincia Artemisa, el municipio Güira de Melena se encuentra ubicado, al sureste de la provincia de Artemisa, limitando al norte con el municipio de San Antonio de los Baños, al este con los municipios Quivicán y Batabanó, al oeste con el municipio Alquizar, y al sur con las aguas del golfo de Batabanó. Posee una extensión territorial de 197,8 km².



Fig.1. Esquema de ubicación del municipio.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Materiales empleados.

Como datos iniciales para la creación del modelo digital de elevación se emplearon los siguientes materiales.

- 1- Curvas de nivel digitalizadas del mapa topográfico 1: 25 000 del municipio Güira de Melena con equidistancia cada 2,5 metros.
- 2- Cotas de altura del mapa topográfico 1: 25 000 del municipio.

Como software para la interpolación se empleó el Encom Discover de MapInfo, el cual posee el desarrollo de diferentes algoritmos que permiten la interpolación de los datos a partir de líneas y puntos con valores conocidos de altura.

Selección del tamaño de celda óptima para el modelo.

La selección del tamaño de la celda para la creación del modelo digital de elevaciones es un paso importante en la creación de los modelos digitales, si se selecciona un tamaño inadecuado se pueden presentar errores en el modelo esperado, así un tamaño de celda mucho mayor del esperado permite que los objetos que están separados en la realidad se junten o empastelen creando deformaciones o irregularidades durante la interpolación, por otro lado si se elige un tamaño mucho menor puede suavizar y aumentar el tamaño del grid creado innecesariamente, lo que causaría pérdida de tiempo y demora durante el manejo de los datos interpolados.

El tamaño óptimo de celda utilizado para los métodos de interpolación seleccionados fue elegido mediante el propio algoritmo del sistema de la herramienta Griding del Discover de Mapinfo, el cual recomienda como tamaño de celda óptima 1/5 de la distancia promedio a la cual están separados los datos. Estos resultados se compararon con los recomendados

por la ESRI donde recomiendan emplear el tamaño de celda en función de la escala utilizada y la precisión de los datos de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Tamaño de Celda} = (\text{Escala de trabajo} \times 0,0254) / 96$$

Donde 0,0254 son las pulgadas representadas en metros y 96 son los dpi (puntos por pulgadas permitidos como máximos por el sistema).

También el tamaño de la celda fue corroborado según el criterio definido por Fernández T. (2008). Donde se plantea que el tamaño de celda o pixel para el modelo raster debe ser $\frac{1}{2}$ del límite de percepción visual (LPV) donde:

$$\text{LPV} = 0,4 \text{ mm} \times \text{escala de trabajo.}$$

Los resultados de la selección del tamaño óptimo de la celda según los tres criterios se muestran a continuación.

Criterio empleado	Tamaño de celda propuesto
Discover de Mapinfo	4
ESRI	6.4
Tomas Fernández	5

Como resultado se eligió el valor de 5 para el tamaño óptimo de la celda a utilizar durante la interpolación de los datos.

Metodología.

La metodología empleada en este trabajo permitirá llevar a cabo un análisis de la calidad de los diferentes Modelos Digitales de Elevación generados por diferentes algoritmos matemáticos para una misma zona (Güira de Melena), Para realizar esta tarea se generan por interpolación distintos modelos, partiendo de los mismos datos fuentes (curvas de nivel y cotas). Finalmente se obtiene para cada modelo una distribución de curvas de nivel que permitirá realizar validaciones cruzadas a partir de la superposición de estas con las originales de partida, teniendo en cuenta la forma de distribución de las mismas, así como los errores (diferencias) entre en los valores de los puntos con las cotas de altura conocidas y los puntos tomados directamente de la lectura del modelo digital generado, lo cual permite hacer una validación sobre el ajuste con menor error y la selección del mejor modelo digital.

La selección de los métodos matemáticos de interpolación se realizó teniendo en cuenta los criterios recomendados en los tutoriales de la herramienta de análisis espacial de datos del SIG Mapinfo (Vertical Mapper en su versión 3.1.1). Los criterios se muestran a continuación:

1. Tipo de datos empleados (relieve)
2. La distribución espacial de los mismos
3. Precisión requerida de acuerdo a los resultados esperados

Métodos de interpolación de atributos.

Algoritmo Triangulación. Red irregular de triángulos (TIN)

Una Red Irregular de Triángulos (TIN) es una representación de superficies continuas derivada de una estructura de datos espacial generada a partir de procesos de triangulación. Una malla TIN conecta una serie de puntos a través de una red irregular de triángulos cuyos vértices se corresponden con dichos puntos, los cuales tienen las coordenadas x, y, z de donde se localizan. La teselación resultante configura el modelo de superficie. Para nuestro caso se empleó el método de triangulación de Delaunay.

Una triangulación de Delaunay es una red de triángulos que cumple la condición de Delaunay. Esta condición dice que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo. La triangulación de Delaunay maximiza los ángulos interiores de los triángulos de la triangulación. Eso es muy práctico porque al usar la triangulación como modelo tridimensional los errores de redondeo son mínimos.

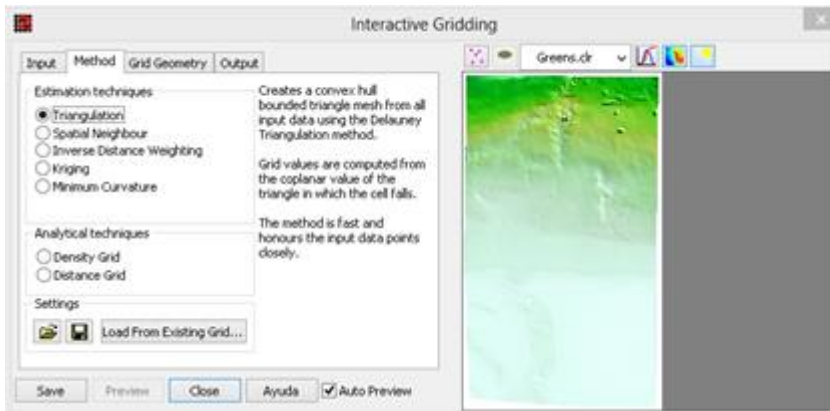


Fig.2. Generación MDE por el algoritmo de triangulación.

Algoritmo Kriging

Es un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. Calcula los pesos que se darán a cada punto de referencias usados en la valoración. Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. Fue desarrollada inicialmente por Danie G. Krige a partir del análisis de regresión entre muestras y bloques de mena, las cuales fijaron la base de la geoestadística lineal.

El kriging puede ser entendido como una predicción lineal o una forma de inferencia bayesiana. Parte del principio: puntos próximos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes. La técnica de kriging asume que los datos recogidos de una determinada población se encuentran correlacionados en el espacio.

Se considera al método de kriging del tipo MELI (Mejor Estimador Lineal Insesgado) o ELIO (Estimador Lineal Insesgado Óptimo): es lineal porque sus estimaciones son combinaciones lineales ponderadas de los datos existentes; y es insesgado porque procura

que la media de los errores (desviaciones entre el valor real y el valor estimado) sea nula; es el mejor (óptimo) porque los errores de estimación tienen una variancia (variancia de estimación) mínima.

Para nuestro caso empleamos el algoritmo de Kriging ordinario con radio de distancia igual a 1000 m, donde las medias locales no son necesariamente próximas de la media de la población, usándose apenas los puntos vecinos para la estimación. Es el método más ampliamente utilizado en los problemas ambientales.

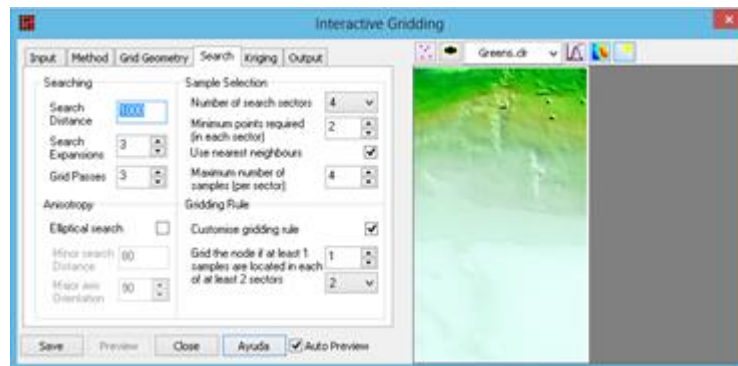


Fig.3. Generación MDE por el algoritmo Kriging.

Algoritmo Spatial Neighbour.

Este método es similar al método de Ponderaciones de Distancia inversa descrito anteriormente, solo que no usa el radio de búsqueda para interpolar los valores de información de celdas vecinas. Para cada celda, los puntos de entrada se ubican basados en el criterio de selección de vecinos espaciales. El valor de la celda computada es el promedio de sus vecinas, ponderadas de manera que mientras más cerca se encuentre el punto vecino, mayor será la influencia con respecto a los puntos que están más alejados.

En este método, los criterios de búsqueda son solamente lineales: sin embargo la distancia y la ponderación aplicada se pueden especificar en una pestaña (pequeña ventana) que se despliega en el método del Vecino Espacial, una vez que se haya seleccionado el método.



Fig.4. Generación MDE por el algoritmo Spatial Neighbour.

Algoritmo Mínima Curvatura

El algoritmo de Mínima Curvatura es ampliamente utilizado en muchas ramas de la ciencia y la investigación. Este método crea una superficie interpolada similar a una placa delgada, linealmente elástico pasa a través de cada uno de los valores de los datos definidos en el conjunto de datos de entrada. Un criterio importante a la hora de elaborar una superficie es el hecho de que la misma posee un mínimo de dobleces/pliegues forzados sobre si para conformar los puntos datos. El grado de dobleces/pliegues se encuentra limitado por un parámetro de tensión y este se puede ser especificado tanto dentro del área de datos, así como a lo largo de los extremos/bordes. La gradación de curvatura mínima genera la superficie más llana/delicada/uniforme/suave, siempre que se trate de respetar los datos tanto como sea posible. Como todos los métodos de gradación, el método de mínima curvatura no resulta una técnica de interpolación exacta. Por lo tanto pudieran producirse ciertos errores entre los valores de datos de entrada y los valores en la superficie interpolada.

El algoritmo de mínima curvatura intenta adaptarse a una superficie mediante todos los puntos de datos sin colocar ningún retorcimiento abrupto en la superficie. Entre los puntos de observación fijados, la superficie se dobla de acuerdo con la tensión interior. Este parámetro se utiliza para controlar la cantidad de distorsión en el interior con la mayor tensión y la menor distorsión. La tensión de Límites controla la cantidad de distorsión en los extremos. Por defecto, la tensión límite se fija en 0.

+El método de mínima curvatura produce una cuadrícula aplicando repetidamente una ecuación sobre los datos en un intento de producir una rejilla que varía suavemente. La iteración se utiliza para describir el número de veces que la ecuación es para ser aplicado a la red. El número máximo de iteraciones se puede especificar en la ficha de curvatura mínima. Los valores de los nodos de la red se vuelven a calcular hasta que se reducen al mínimo los cambios sucesivos en el error entre iteraciones sucesivas, o se alcanza el número máximo de iteraciones.

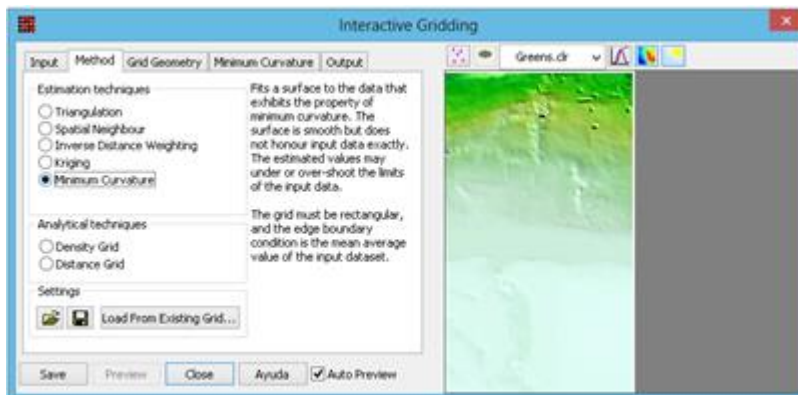


Fig.5. Generación MDE por el algoritmo Mínima Curvatura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A continuación se exponen los principales resultados de la aplicación de los diferentes algoritmos matemáticos de interpolación de atributos, así como la determinación de la fiabilidad de estos modelos teniendo en cuenta la superposición cruzada de las curvas de nivel que marcan el error debido a la diferencia entre la altitud del modelo generado por la interpolación y las del terreno real (curvas de nivel y cotas de altura tomadas directamente de la hoja cartográfica).

Resultados de la aplicación del algoritmo de triangulación

MDE generado por TIN

Contornos generados por el TIN

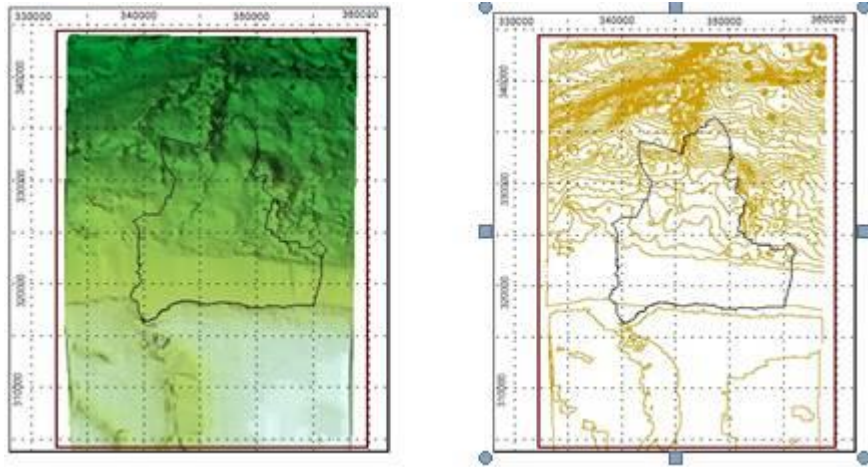


Fig.6. MDE por el algoritmo de triangulación y contornos generados de dicho modelo.

Diferencias entre los resultados de la interpolación y los datos originales de partida

Se puede observar claramente la diferencia marcada entre los datos de partida (ficheros originales de las curvas de nivel en negro) y las curvas en color marrón resultados de la interpolación generada a partir del algoritmo del TIN por lo que el modelo digital generado no presenta un buen ajuste, por lo tanto presenta poca fiabilidad para la representación y generación de atributos a partir del relieve.



Fig.7. Diferencias entre los resultados de interpolación por el TIN y los datos originales.

Resultados de la aplicación del algoritmo de Natural Neighbour

MDE generado por NN

Contornos generados por en NN

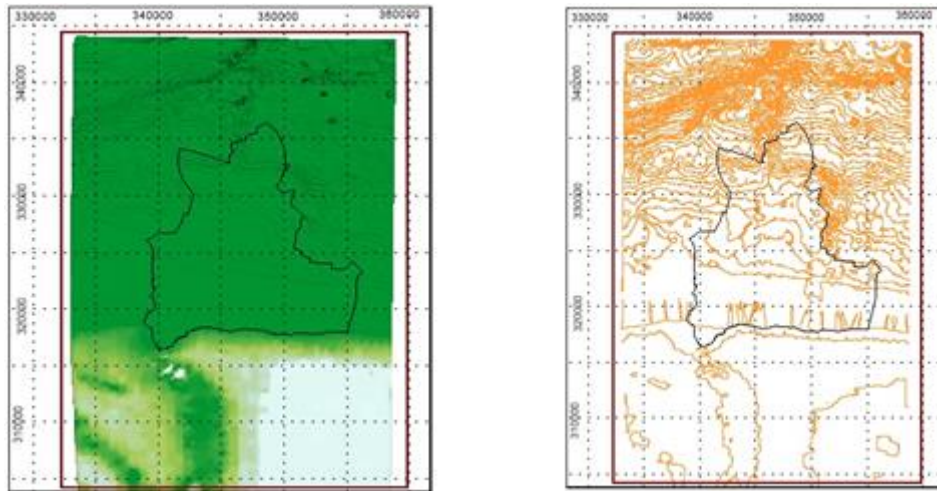


Fig.8. MDE por el algoritmo de Natural Neighbour y contornos generados de dicho modelo.

Diferencias entre los resultados de la interpolación y los datos originales de partida

Se puede observar claramente la diferencia marcada entre los datos de partida (ficheros originales de las curvas de nivel en negro) y las curvas en color marrón claro resultados de la interpolación generada a partir del algoritmo del NN, así como la generación de pequeños artefactos creados por interpolación, (curvas falsas) por lo que el modelo digital generado no presenta un buen ajuste y por lo tanto presenta poca fiabilidad para la representación y generación de atributos a partir del relieve.



Fig.9. Diferencias entre los resultados de interpolación por Natural Neighbour y los datos originales.

Resultados de la aplicación del algoritmo de Kriging.

MDE generado por Kriging

Contornos generados por Kriging

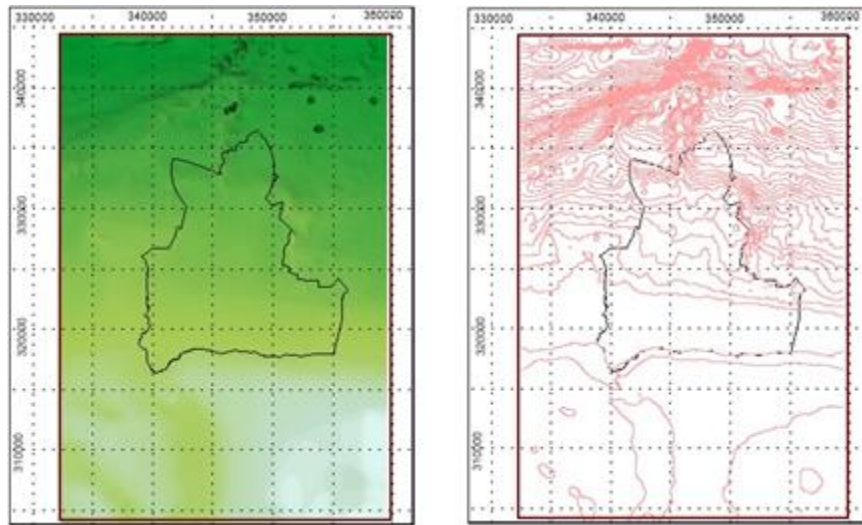


Fig.10. MDE por el algoritmo kriging y contornos generados de dicho modelo.

Diferencias entre los resultados de la interpolación y los datos originales de partida

Se puede observar claramente la diferencia marcada entre los datos de partida (ficheros originales de las curvas de nivel en negro) y las curvas en color rojo claro, resultados de la interpolación generada a partir del algoritmo del Kriging, este método presenta un mejor ajuste que los dos anteriormente presentados, aunque todavía se observan diferencias e irregularidades en las formas de los contornos de ambas curvas, por lo que el modelo digital generado a pesar de presentar un mejor ajuste no es totalmente confiable.

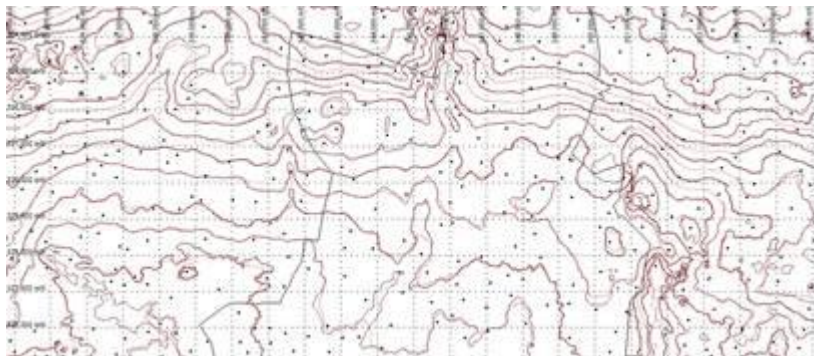


Fig.11. Diferencias entre los resultados de interpolación por Kriging y los datos originales.

Resultados de la aplicación del algoritmo de Mínima Curvatura.

MDE generado por Minina Curvatura

Contornos generados por Mínima Curvatura

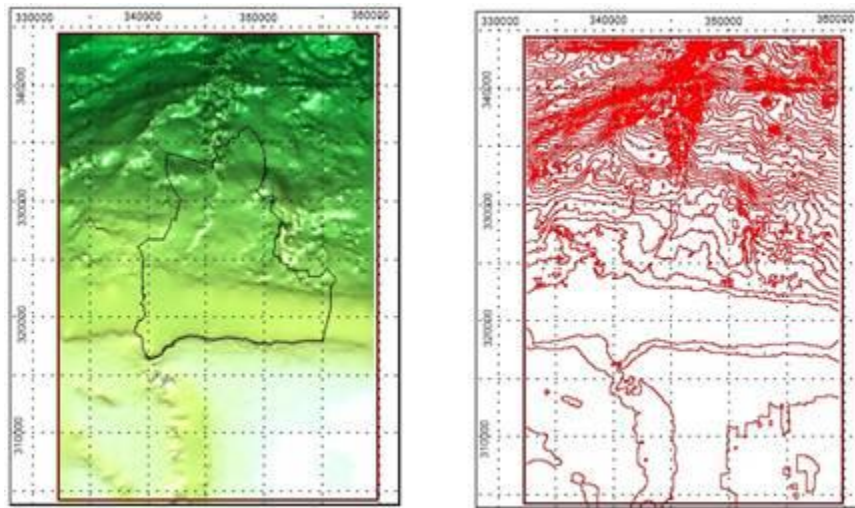


Fig.12. MDE por el algoritmo Mínima Curvatura y contornos generados de dicho modelo.

Diferencias entre los resultados de la interpolación y los datos originales de partida

Como puede observarse existe una coincidencia casi total entre los contornos de ambas curvas, así como en los valores de las cotas originales y los valores obtenidos directamente de la lectura del modelo, por lo que en nuestro caso la aplicación de este algoritmo y su modelo generado cumplen con la calidad requerida para escogerlo como el óptimo que representa la estructura del relieve de la zona de Gúira de Melena.

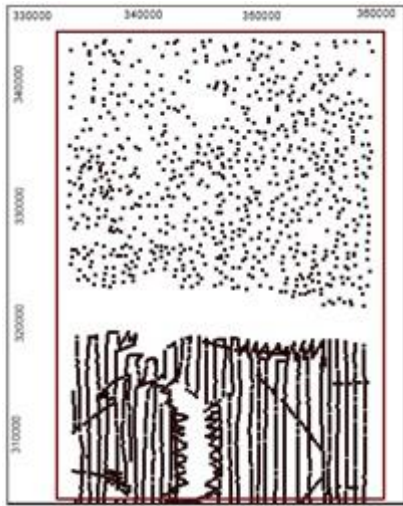


Fig.13. Diferencias entre los resultados de interpolación por Mínima Curvatura y los datos originales.

Determinación del error por interpolación a partir de los valores de las cotas altimétricas.

Para estimar la precisión de la interpolación a partir de los valores de las cotas con valores reales de altimetría y calcular el error de interpolación para los diferentes métodos, se procedió a realizar una evaluación estadística para el 10 % del total de los puntos con valores de cotas conocidas. Se determinaron 43 puntos distribuidos de forma aleatoria cubriendo los bordes exteriores y la parte central de la zona objeto de estudio como se muestra en la fig. No.

Distribución de cotas reales



Distribución de puntos de control

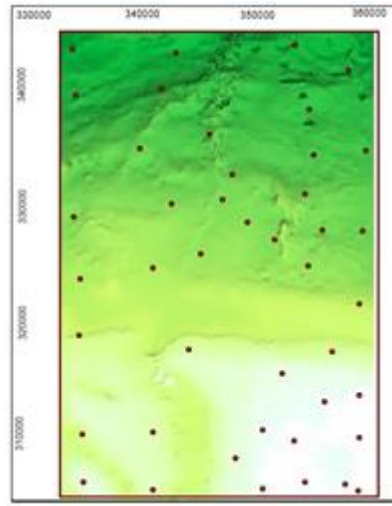


Fig.14. Distribución de cotas reales y puntos de control.

Una vez seleccionados los puntos con valores de cotas reales se procedió a superponer los mismos sobre el modelo digital generado y se capturaron los valores de estos puntos directamente del modelo, ambas lecturas fueron comparadas y se calcularon las diferencias entre ambas mediante un análisis estadístico. Esto se realizó para cada uno de los modelos generados permitiendo escoger el método de mayor fiabilidad en la exactitud de la interpolación. A continuación se muestran los resultados del análisis estadístico.

Estadígrafos determinados para el TIN



Estadígrafos determinados para NN



Estadígrafos determinados para el Kriging

Estadígrafos determinados para MinC

Column Statistics	
Table:	cotas_de_control_stats__
Column:	Dif_K
Count:	43
Minimum:	0
Maximum:	2,38
Range:	2,38
Sum:	13,29
Mean:	0,30907
Variance:	0,195241
Standard Deviation:	0,441961

Column Statistics	
Table:	cotas_de_control_stats__
Column:	Dif_MC
Count:	43
Minimum:	0
Maximum:	0,35
Range:	0,35
Sum:	0,68
Mean:	0,015814
Variance:	0,00311271
Standard Deviation:	0,0557917

Como se puede apreciar por los resultados estadísticos no existen grandes errores de interpolación, la mayor diferencia fue de solo 2 metros en un solo punto con la aplicación del algoritmo de Kriging, en todos los demás casos los errores entre las comparaciones de las lecturas tomados directamente del modelo digital y los valores reales de las cotas fueron inferiores a los 30 cm. Por lo que podemos afirmar que los métodos de interpolación empleados presentan buena fiabilidad para representar los datos del relieve.

CONCLUSIONES.

1. Existen diferencias significativas durante la aplicación de los diferentes algoritmos matemáticos para la generación de modelos digitales de elevación cuando la variable o componente espacial es la altura del relieve.
2. El método de interpolación que resultó mejor ajustado a los datos iniciales de partida fue el algoritmo de Mínima curvatura.
3. El método de interpolación con mayor precisión en la determinación de los valores de las cotas fue el algoritmo del Vecino natural.

RECOMENDACIONES.

1. Durante la generación de un DEM se deben emplear los diferentes métodos de interpolación y seleccionar cual es el de mejor calidad con respecto a los datos de entrada.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Aguilar, M. A (2001) et al Evaluación de diferentes técnicas de interpolación espacial para la generación de modelos digitales de elevación del terreno agrícola Mapping nº 74.
2. Carter, J.R. (1988) Digital representation of topographic surfaces. Photogrametric Engineering & Remote Sensing, vol 54, nº 11, pp 1577-1580.
3. Cuartero, A (2001) et al Análisis del error en modelos digitales de elevaciones según la fuente de datos XIII Congreso Internacional de Expresión Gráfica, Badajoz.
4. Declercq, F.A.N. (1996) Interpolation methods for scattered sample data: accuracy, Spatial patterns, processing time. Cartography and Geographic Information Systems, 23 (3): 128-144.
5. Felicísimo, A. M. (1994) Modelos Digitales del Terreno. Oviedo (España): Pentalfa, ISBN: 84-7848-475-2.
6. Martínez R (2001) et al Análisis de las metodologías habituales para la generación de modelos digitales del terreno Mapping nº 71.
7. Morillo Barragán.J (2002) et al Análisis de calidad de un modelo digital de elevaciones generado con distintas técnicas de interpolación. Universidad de Extremadura, España.
8. U.S.G.E (1997) Department of the Interior *Standards for Digital Elevation Models U.S. Geological Survey* National Mapping Division.
9. <http://mapping.usgs.gov/standards/index.html>
10. Vega, M., K. Zubiatur, y Y. González (2000): Empleo del modelo digital del terreno para el estudio morfométrico de la Sierra de los Órganos. En CD 5to. Taller Internacional Informática y Geociencias, Ciudad Habana, Memorias marzo del 2000. ISSN 1028-8961
11. Vega, M., Y. González K. Zubiatur, y J. L. Gil (2000): Utilidad del empleo de datos digitales del relieve y el drenaje de una región para estudios geológicos. Aplicación en la Sierra de los Órganos. En CD II Congreso Internacional de Geomática, Ciudad Habana, Memorias mayo del 2000, ISBN 959-7160-01-3.
12. Vega M et al. (2002). Aspectos conceptuales y formales de los modelos digitales del terreno relacionados con las ciencias de la tierra. Inédito.