



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

EVALUACIÓN DE FACTORES DE ESCALA EN LOS MÉTODOS DE DIGITALIZACIÓN E INTERPOLACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE) EN CUENCAS MONTAÑOSAS

Tesis para optar al grado de Magíster Scientiae en "Manejo de Cuencas Hidrográficas"

POR: ING.FOR. CARLOS E. PACHECO A.
PROF. TUTOR. ALEX G. BARRIOS R.
PROF. ASESOR. JUAN LOPÉZ

Mérida, Venezuela.
2003.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento:

A la Universidad de los Andes, mi Alma Mater, casa de mi formación profesional

Al CEP, CEFAP y su Programa de Maestría de Manejo de Cuencas, su personal académico, administrativo y obrero, gracias por su trabajo.

Al Profesor Alex Barrios, por su tutoría académica, formación profesional, amistad y buenos consejos.

Al Profesor Juan López, por su asesoría, incentivo y buenos consejos.

Al personal del Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos, Profesores Ennio Pozzobbon, Otto Jurgenson y García Guzmán al Ing. Arturo Osorio y Perito Forestal Francisco Carrillo gracias por su colaboración en el transcurso de mi investigación.

Y finalmente le doy gracias a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este trabajo.

RESUMEN

En el presente estudio se evaluaron los métodos de interpolación en la construcción de Modelos Digitales de Elevación (MDE) con fines hidrológicos en una cuenca de montaña tropical, incluyendo una evaluación comparativa de los métodos de digitalización y el efecto de escala (escala del mapa, la equidistancia entre curvas de nivel y el tamaño de píxel) en la exactitud del MDE generado.

La comparación entre los métodos de digitalización se sustentó en el tiempo demorado para obtener el archivo vectorial y en la fidelidad para la reproducción de las curvas originales. Este último aspecto se evaluó gráficamente y estadísticamente mediante sus coordenadas. Los resultados indicaron que el método Semi – Automático obtuvo menor tiempo y menor raíz del error medio cuadrático (REMC).

Para la evaluación del efecto de la escala se utilizaron los parámetros hidrográficos y topográficos que se derivaron de 72 MDE, con tamaño de píxel de 1, 10, 15, 20, 30, 50, 100 y 150 m, equidistancias entre curvas de nivel de 20, 40, 80, 120 y 200 m y escalas: 1 / 25.000 y 1 / 100.000. Estadísticamente, los mejores resultados se obtuvieron con los MDE de tamaño de píxel de 30 m, equidistancia de 40 m y escala 1/25.000, mientras que hidrológicamente no se obtuvieron marcadas diferencias entre los factores de escala.

En la evaluación de los métodos de interpolación, se determinó la REMC y se realizó un análisis morfométrico de la cuenca. Los resultados indican que los métodos de interpolación Red de Triángulos Irregulares (TIN), Interpolación Lineal (INTERCON), Kriging, Spline con Tensión y Regularizado pueden ser utilizados para generar MDE en montañas con fines hidrológicos a excepción del método de Interpolación ponderada por el Inverso de la Distancia (IDW) quien resultó deficiente en las evaluaciones realizadas.

Palabras Claves: Modelos Digitales de Elevación (MDE), cuenca de montaña, métodos de digitalización, escala del mapa topográfico, equidistancia entre curvas de nivel, tamaño del píxel, métodos de interpolación.

ABSTRACT

The current study evaluates the interpolation methods in the construction of a Digital Elevation Methods (DEM), with hydrologic purposes on mountainous watershed tropical. It includes a comparative evaluation of the digitalization methods and the scale effect (scale of maps, the equidistance between level of curve and the size of the pixel), in the accuracy of the DEM generated.

The comparison between the digitalization methods was supported on the time delayed to obtain the vectorial file and the fidelity for the reproduction of the original curves. The last aspect was evaluated graphically and statistically through its coordinates. The results indicated that the Semi-automatic method obtained less time and less root of medium quadratic error (RMQE).

To the evaluation of the scale effect was used the hydrographic and topographic parameters that came from to 72 DEM, with the pixel size of 1, 10, 15, 20, 30, 50, 100 and 150 meters. The equidistance between the curve of the levels 20,40,80,120 and 200 meters and the scale: 1/25.000 and 1/100.000. Statistically, the best result was obtained with the size of the DEM pixel of 30 m, the equidistance of 40 m, and the scale 1/25.000, while hydrological didn't obtain different marks between the scale factors.

In the evaluation of the interpolation method was determined the RMQE and was done a morphometric analysis of the water set. The results indicates that the interpolation methods Triangle Irregular Net (TIN), Lineal Interpolation (INTERCOM), Kriging, Spline with stress and regulated can be used to generate a mountain DEM with an exception of the interpolation method pondered by the Inverse of the Distance (IDW) that resulted deficient in the evaluation done.

KEY WORDS: Digital Elevation Method (DEM), mountainous watershed, digitalization method, topographic map scale, equidistance between the levels of curves, size of the pixel, interpolation method.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE APENDICES	xi
1.- Introducción	1
1.1.- Planteamiento del problema	1
1.2.- Antecedentes	2
1.3.- Objetivos	5
1.3.1.- General	5
1.3.2.- Específicos	5
2.- Características generales del área de estudio	6
2.1.- Ubicación y superficie	6
2.2.- Geología	6
2.3.- Geomorfología y relieve	8
2.3.1.- Geomorfología	8
2.3.2.- Relieve	9
2.4.- Suelos	9
2.5.- Hidrología	10
3.- Metodología	11
3.1.- Métodos de digitalización	11
3.1.1.- Método de pantalla	11
3.1.2.- Método de tableta	14
3.1.3.- Método semi – automático	16
3.1.3.1.- Método semi – automático (Cad Overlay 2000i)	18
3.1.3.2.- Método automático (TNT Mips 6.5)	19
3.1.4.- Criterio de comparación entre los métodos de digitalización	22
3.1.4.1.- Selección de puntos de control para determinar la REMC	22
3.1.4.2.- Puntos homólogos en curvas y drenajes digitalizados	23

3.1.4.3.- Raíz del error medio cuadrático	23
3.2.- Factores de escala	24
3.2.1.- Digitalización de las cartas topográficas	25
3.2.2.- Evaluación de los efectos equidistancia entre curvas de nivel, tamaño de píxel y escala del mapa en la generación de los MDE	25
3.2.3.- Método de interpolación para la generación de los MDE	27
3.2.4.- Criterios de evaluación	27
3.2.4.1.- Criterio estadístico	28
3.2.4.2.- Criterio hidrográfico	30
3.3.- Métodos de interpolación	31
3.3.1.- Descripción de los métodos de interpolación	31
3.3.1.1.- TIN (red de triángulos irregulares)	31
3.3.1.2.- INTERCON (interpolación lineal)	32
3.3.1.3.- IDW (interpolación ponderada por el inverso a la distancia)	32
3.3.1.4.- Kriging	33
3.3.1.5.- Spline (interpolación spline regularizada y con tensión)	34
3.3.2.- Puntos acotados para la construcción de los MDE	34
3.3.3.- Evaluación de los métodos de interpolación en la construcción de los MDE	35
3.3.3.1.- Criterio estadístico	35
3.3.3.2.- Criterio visual	36
3.3.3.3.- Criterio morfométrico	37
4.- Materiales	39
5.- Resultados y discusión	40
5.1.-Métodos de digitalización	40
5.2.- Efecto de factores de escala en la generación de los MDE	45
5.3.- Métodos de interpolación en la construcción de los MDE	52
6.- Conclusiones y recomendaciones	58
7.- Referencias bibliográficas	59
Apéndice	63

INDICE DE FIGURAS

Figura	pág
1 Ubicación relativa nacional y regional del área de estudio	7
2 Ubicación del área en estudio dentro de las Cartas del IGVSB a 1:100.000	11
3 Procedimiento empleado para digitalizar en pantalla	12
4 Procedimiento empleado para digitalizar en pantalla	14
5 Procedimiento empleado para digitalizar en forma Semi-Automática y Automática	16
6 Procesamiento de la imagen en CAD Overlay 2000i	19
7 Procesamiento y vectorización digital de la imagen	21
8 Algunos puntos de control obtenidos a través de la intersección de las curvas de nivel y los drenajes digitalizados	22
9 Puntos de control seleccionados y algunos cálculos para estimar la Raíz del Error Medio Cuadrático de la variable X, Y.	24
10 Ubicación cartográfica de la parte alta del área en estudio	25
11 MDE construidos con las diferentes equidistancia entre curvas de nivel, tamaño de píxel y escalas	26
12 Factor escala del mapa	26
13 Factor equidistancia entre curvas de nivel	27
14 Factor tamaño del píxel o resolución del modelo raster	27
15 Esquema metodológico del modelaje cartográfico en SIG	29
16 Esquema de cálculo de la REMC para la variable Z	28
17 Medida del desplazamiento (área punteada) de la red hidrográfica	

generada (negra delgada) con la digitalizada del mapa original(gris gruesa)	30
18 Red de Triángulos Irregulares (TIN)	31
19 INTERCON (Interpolación Lineal)	32
20 IDW (Interpolación Inversa a la Distancia)	33
21 Método de Interpolación Kriging	33
22 Determinación de puntos acotados para la generación de los MDE	35
23 Calculo de la Raíz del Error Medio Cuadrático para evaluar los MDE obtenido mediante diferentes métodos de Interpolación	36
24 Criterios morfométricos para comparar los métodos de interpolación	38
25 Tiempo neto registrado durante el proceso de digitalización en sus tres métodos (Tableta, Pantalla y Semi – Automático)	40
26 Curvas digitalizadas sobre mapa original: (a) Pantalla, (b)Tableta y (c)Semi – Automático	42
27 Raíz del Error Medio Cuadrático calculado para las curvas de nivel y los drenajes originados mediante los métodos de Pantalla, Tableta y Semi – Automático	43
28 Tiempo neto demorado en la digitalización de las curvas de nivel y los drenajes originados a escala 1/100.000 y 1/25.000	44
29 Curvas (a) y drenajes (b) digitalizados a escala 1/100.000 (azul) y 1/25.000 (rojo)	44
30 Resultados: Raíz de los errores medios cuadráticos de los MDE producidos	45
31 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	46
32 Longitud de drenajes, para un umbral de 250 ha	47
33 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 m y a escala 1 / 100.000	48
34 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	49
35 Pendiente media en porcentaje de MDE con equidistancia de 20, 40 y 80 m, resolución de 10, 30 y 100 m a escala 1 / 25.000 y MDE con equidistancia de 40 y 80 m, resolución de 10, 30 y 100 m a escala 1 / 100.000	50
36 Comparación visual de la red hidrográfica generada (rojo) con la digitalizada del mapa original(azul) a partir de un MDE a escala 1:25.000, equidistancia 40m y tamaño de píxel 30 m	51
37 Efecto de escala sobre la red hidrográfica generada: (a) escala del mapa topográfico. (b) equidistancia entre curvas de nivel y tamaño del píxel	51
38 Resultados de la REMC para los diferentes MDE con las dos bases de datos	52
39 Comparación de curvas de nivel cada 40 metros generadas a través de los diferentes MDE	53
40 Red de drenaje digitalizada y generada mediante los diversos MDE	55
41 Comparación de los drenajes digitalizados (azul) y los generados a través de los diferente MDE (rojo)	56
42 Comparación de las divisorias originales (azul) y las generados a través de los dif0erente MDE (rojo)	57

INDICE DE CUADROS

Cuadro	pág
1 Coordenadas y REMC registrados durante la georreferenciación de la imagen	13
2 Coordenadas y REMC registrados en la digitalización en tableta	15
3 Coordenadas y REMC registrados en la digitalización semi – automática	18
4 Variables morfométricas derivada de los diferentes MDE.	54

INDICE DE APÉNDICES

Apéndice	pág
A. Evaluación y comparación de los diferentes métodos de digitalización	64
A.1. Método de digitalización por Pantalla	65
A.2. Método de digitalización Semi – Automático	70
A.3. Metodología para evaluar estadísticamente los métodos de digitalización	72
B. Evaluación del efecto de factores de escala en la generación de los MDE	75
B.1. Procedimiento en Arc View 3.2 para la construcción de los MDE	76
B.2. Procedimiento para la definición de los puntos de control y derivación de cotas en el MDE de error medio cuadrático	78
B.3. Procedimiento para generación de red de drenaje en los MDE mediante CRWR – PREPRO	81
B.4. Metodología utilizada para determinar la medida de desplazamiento de la red hidrográfica generada	84
C. Evaluación y comparación de métodos de interpolación en la construcción de los MDE	87
C.1. Creación de los puntos acotados para la construcción y evaluación de los MDE	88
C.2. Construcción de los MDE con los diferentes métodos de interpolación	90
C.3. Análisis morfométrico para la evaluar los métodos de interpolación	96

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Planteamiento del Problema

Actualmente los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son indispensables en los estudios hidrológicos, sobre todo en la emergente “hidrología espacial” así como en la aplicación de modelos hidrológicos de cuencas. Estos últimos a su vez son necesarios en el manejo de cuencas para la evaluación de los impactos del uso de la tierra y de las prácticas de conservación y manejo propiamente dicha.

De los métodos disponibles para obtener MDE, los más utilizados todavía siguen siendo aquellos derivados de curvas de nivel, disponibles en mapa topográficos.

Diversos estudios (Mitasova, 1999 y Wechsler, 1999) indican la necesidad de utilizar resoluciones grandes al construir los MDE, además de pequeñas equidistancias entre curvas de nivel (ejemplo: equidistancia entre curvas de nivel 5 m y tamaño de píxel 2 m).

Sin embargo, se tiene la impresión de que tales estudios se refieren a zonas planas donde se requiere elevada precisión en la topografía del terreno a objeto de la definición de la ruta de drenaje de una gota de agua. En el presente estudio se parte de la hipótesis de que para cuencas de montaña los requerimientos en cuanto a factores de escala (escala del mapa topográfico, equidistancia entre curvas de nivel y resolución del MDE) no son tan elevados.

Por otra parte, en los paquetes informáticos del mercado están disponible diversos métodos de interpolación, necesarios para construir el MDE a partir de puntos acotados, los cuales han sido comparados en algunos estudios (Aguilar et al, 2002 y Vilchez, 2000) aunque con un conjunto limitado de factores de escala, generalmente diferentes resoluciones de píxel.

El presente trabajo se orienta a buscar una respuesta a la incertidumbre que se presenta a los especialistas en manejo de cuencas, que utilizan modelos hidrológicos, a la hora de construir el MDE de la cuenca de estudio: cuál escala de mapa, cuál equidistancia entre curvas y cual método de interpolación, deben elegir sin perder precisión, desde el punto de vista hidrológico, pero sin incrementar las necesidades de memoria y de tiempo de ejecución.

1.2.- Antecedentes

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). Estas estructuras de datos permiten analizar la superficie del terreno donde se describe la forma del paisaje y la influencia de la topografía en los procesos ambientales, tales como el flujo de agua y la radiación solar (TAPES, 2000).

Existen dos maneras de obtener datos geográficos para la construcción de los MDE; una es realizando medidas directas sobre la superficie real del terreno y la otra es utilizando métodos indirectos en donde no existe contacto con el terreno.

Con el primer método los datos se obtienen a través de estaciones topográficas tradicionales y avanzadas que permiten generar y almacenar los resultados de sus medidas en formato digital. Weidner y Foster (1995), construyeron un MDE con alta resolución, 0.5m * 0.5 m en zonas urbanas, utilizando técnicas digitales de "láser scanning" las cuales trabajan con sensores de rayos láser.

En este grupo también se encuentran los altímetros tradicionales y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) (Ruiz, et al., 1996). Cuyo funcionamiento se realiza con un conjunto de satélites de referencia y mediante métodos de triangulación, que permiten obtener valores de las tres coordenadas espaciales para un lugar, localizado sobre la superficie terrestre (Longley et al. 1999).

El segundo método es el más frecuentemente utilizado para la generación de los MDE, ya que no necesita acceder físicamente a la totalidad de la zona en estudio, es el método indirecto, donde encontramos dos formas de desarrollo: Digitalización y Restitución.

La digitalización, consiste en convertir la información analógica (mapas topográficos preexistentes) en información numérica digital: de forma manual mediante una tableta digitalizadora (Carter, 1988, Aumann et al., 1991 y Nero y Cintra 2001); manual en pantalla previo escaneo del mapa para obtener una imagen raster, la cual es puesta de fondo en la pantalla (Nero y Cintra 2001); o bien automáticamente, utilizando una imagen raster procesada para generar los archivos vectoriales en forma semi-automática y automática, rastreando los píxeles de igual color de manera interactiva o automática (Levachkine 2000, Decelis 2001, GPI 2002 y Terrainmap, 2002),.

La restitución, tiene a su vez dos maneras para realizar los MDE, una es de origen analógico en donde se utiliza un conjunto de pares estereoscópicos de fotografías aéreas convencionales (pancromática, color, infrarrojo), trabajando sobre la base de métodos fotogramétricos que, examinando puntos homólogos en los pares estereoscópicos, deduce de su paralaje las cotas de referencia necesarias para reconstruir la topografía; tal es el caso de Claus (1984), que mediante esta metodología realizó el cálculo para identificar los puntos homólogos y Allan (1978), que midió el paralaje y estimó las altitudes.

Otra manera de realizar restitución es de origen digital; desde 1986, a partir de imágenes estereoscópica de Satélite SPOT (Day y Muller 1989), y, en la actualidad existen varias alternativas como las imágenes del sensor ASTER, montado sobre el Satélite TERRA (Terrainmap, 2002).

Esta restitución digital también puede obtener sus datos a partir de los Radares de Apertura Sintética (SAR), montada sobre plataforma Satelital (Sung, et al. 2000), o bien sobre plataforma de avión (DIELMO, 2002). Y más recientemente se cuenta con la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging), que es similar al RADAR, (DIELMO, 2002).

A pesar de la gran variabilidad de los métodos existentes para la entrada de datos y la construcción de los MDE, el más utilizado es la digitalización (Bosque, 1992 y Longley et al. 1999), lo cual se explica por el elevado costo de los demás métodos, tanto en el trabajo de campo, como en la adquisición de imágenes de satélite y equipos de restitución.

Lo fundamental en la construcción de los MDE, mediante la digitalización, es la elección de la escala y equidistancia entre curvas de nivel del mapa y la resolución del píxel del modelo raster (Longley et al. 1999). Esta elección es usualmente un compromiso por la fidelidad de una verdadera superficie requerida para el proceso de simulación en los MDE, tal y como lo afirman Rossiter y Rodríguez (2000), quienes construyeron Modelos Digitales del Terreno (MDT) para la evaluación de tierras y consideraron los parámetros de la equidistancia entre curvas de nivel, la resolución de la malla y la generalización cartográfica como de suma importancia en la construcción de los MDT; Mitsova et al. (2000), explicaron la influencia de la resolución espacial en los MDE en el análisis topográfico y en el modelamiento de erosión; Garbrecht y Martz (1999), comentan sobre la capacidad y limitación de los MDE para el modelado del recurso agua y especifica la calidad de los datos disponibles y la resolución del píxel como los responsables y Fairfield et al. (1991) aclaran la desventaja de no conocer el tamaño adecuado del píxel para calcular parámetros topográficos. Para evitar inconvenientes algunos autores construyeron MDE con alta resolución, a gran escala y con una equidistancia entre curvas de

nivel baja, tal es caso de Weidner y Forstner (1995) y DIELMO (2002), pero sin embargo, no siempre es posible esta solución debido a limitaciones de presupuesto y escasez de datos básicos.

Otro de los elementos considerables a la hora de generar un MDE mediante la digitalización son los métodos de interpolación espacial. métodos que son producidos para estimar espacialmente los valores de un sitio. Sakozy (1998), señala cuatro categorías de métodos de interpolación: geométrico, estadístico, funciones base y redes neurales artificiales.

El método Geométrico, según el enfoque de Voronoy, consiste en que algunas celdas van a representar puntos muestrales en torno a los cuales se generan polígonos de Thiessen y se trazan líneas perpendiculares a cada lado, a objeto de formar triángulos, a partir de los cuales se generan ecuaciones que calculan la altura en cualquier punto interior del mismo. Este método es utilizado para calcular precipitaciones y para generar modelos de superficies TIN.

Los métodos de interpolación Estadísticos hacen uso de la auto correlación entre los puntos muestrales, para asignarles valores promedios ponderados a los puntos que no tienen información. Entre estos métodos se encuentra el Área que roba la interpolación (Gold, 1991), que se basa en los mosaicos de Voronoy y también es llamada interpolación natural de los vecinos, el método del Peso de la Inversa a la Distancia, en donde el peso es un valor inversamente proporcional a la distancia entre cada punto muestral considerado y el no muestral, al cual se le hallan las alturas; y el método kriging que se basa en una función matemática que mide la variabilidad (variograma) como instrumento de representación esquemática de la variedad espacial.

Entre los métodos de interpolación correspondientes a la categoría de Funciones Base encontramos: el método el Análisis de Superficie Tendencial, que ajusta a la variable Z a una ecuación de regresión, cuyas variables explicativas son X e Y, todas referidas a los puntos muestrales, la cual puede ser lineal, cuadrática, cúbica, etc; El método Spline Suavizado Regularizado y con Tensión, que consiste en definir los valores regulares de un punto en la celda, encontrando la primera función continua de las variables espaciales, que toman valores de medidas que dan la posición; y el método de Polinomios Locales, donde se utilizan polinomios de segundo y tercer grado para encontrar el valor de la variable Z.

El más reciente método de Redes Neurales Artificiales, derivado de investigaciones realizadas a los sistemas neurales humanos los cuales son adaptados y simulados a través de un algoritmo que asigna los valores espaciales.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- General

- Evaluar el factor de escala en los métodos de digitalización e interpolación, para la elaboración de MDE.

1.3.2.- Específicos

- Evaluar y comparar, en cuanto a rapidez y precisión, los diferentes métodos de digitalización: manual (tableta y pantalla) y automatizada, bajo ambiente SIG.
- Evaluar el efecto de los factores escala del mapa, equidistancia entre curvas de nivel y resolución espacial en la exactitud del MDE.
- Realizar un análisis comparativo entre los diferentes métodos de interpolación para la elaboración de los MDE, utilizando herramienta SIG.

2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO

La siguiente descripción fue tomada de Gutiérrez (1999).

2.1.- Ubicación y Superficie

La cuenca del Río Mucujún se encuentra ubicada entre las siguientes coordenadas geográficas: 08° 35' 39" y 08° 49' 27" de latitud Norte ; 70° 58' 30" y 71° 09' 45" de longitud Oeste.

Geográficamente comprende una parte de Los Andes Centrales Venezolanos en el estado Mérida, específicamente denominada Cuenca del Río Mucujún, constituida por un valle longitudinal a la cordillera, muy cercana a la Ciudad de Mérida. Desde el punto de vista político-administrativo y según la Ley de División Político Territorial del Estado Mérida aprobada en 1.992, el área de estudio pertenece al Municipio Autónomo Libertador y ocupa la mayor parte del territorio de la Parroquia Gonzalo Picón Febres de este municipio.

La cuenca del Río Mucujún se extiende desde la desembocadura del mismo en el Río Chama, en las cercanías de la ciudad de Mérida, a 1.400 m.s.n.m., hasta su nacimiento a 7,75 Km, aguas arriba, a 4.400 m.s.n.m., ocupando una superficie de 190,92 Km² (Figura 1).

2.2.- Geología

La cuenca del Río Mucujún forma parte de una fosa tectónica, definida por una serie de fallas, producto de la intensa actividad orogénica que se ha venido dando a través del tiempo, la cual constituye uno de los factores principales en su configuración. Esta presenta dos sistemas morfológicos bien definidos: el primero, constituido por dos bloques bien levantados, representado por las vertientes y el segundo, un bloque deprimido que forma el fondo de valle, ambos se encuentran parcialmente delimitados por dos fallas principales, que tienen dirección NE-SW, extendiéndose una de ellas por la margen derecha del Río Mucujún y la otra por la vertiente izquierda. Existen otras fallas de menor importancia que establecen contactos litológicos entre los sedimentos de las formaciones geológicas, creando a su vez desniveles de altura.

Las vertientes ocupan la mayor parte de la superficie total de la cuenca y están conformadas estratigráficamente por material "in situ", constituido por formaciones geológicas que a través del tiempo han venido siendo modeladas y cuya intensidad depende directamente de la resistencia, grado de alteración y fracturamiento a que están sometidas las rocas.

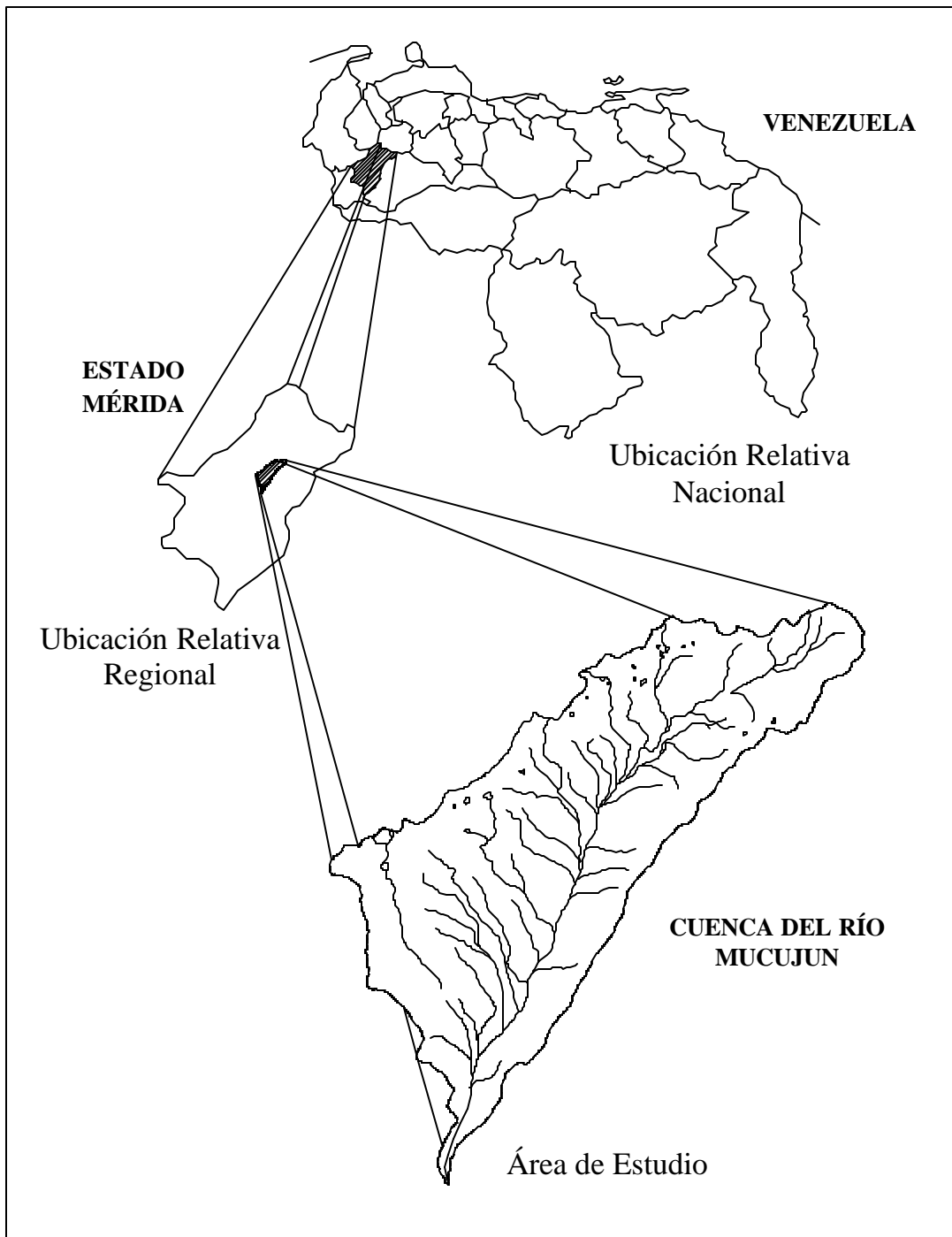


Figura 1. Ubicación relativa nacional y regional del área de estudio.

La vertiente izquierda se corresponde litológicamente con la era más antigua, el Precámbrico, representado por la Granodiorita del Carmen. Esta vertiente se caracteriza por presentar una inclinación de sus pendientes que origina un relieve bastante pronunciado, presentando depósitos cuaternarios en el fondo de valle. Las formaciones presentes en esta vertiente son la Mucujún y Sierra Nevada.

La vertiente derecha se caracteriza por una serie de formaciones litológicas que van desde las más antiguas del Precámbrico hasta las más recientes del Terciario; el Precámbrico se encuentra representado por la Formación Sierra Nevada, ocupando gran superficie y localizándose en las partes de mayor altitud de la vertiente, además están presentes las formaciones El Granito, Palmarito, Aguardiente, Capacho, La Luna, Colon, El Valle y Mucujún.

2.3.- Geomorfología y Relieve

2.3.1.- Geomorfología

- *Cuenca alta (2.900 - 4.500 m.s.n.m.)*

Está conformada por una litología fundamentalmente cristalina (granito, gneis, esquistos y granodiorita) que ofrece mayor resistencia a ser alterada, atenúa los efectos de los agentes modeladores de tipo externo, evitando, en lo posible, la alteración y fracturamiento de las rocas. A su vez existe un predominio del escurrimiento superficial concentrado, producto de la cobertura vegetal y de pendientes moderadamente fuertes. Procesos como la gelifración y otros procesos glaciares han dado como resultado un relieve accidentado, conformado por una alineación de altos picos, rocas aborregadas, estriadas, laminadas, fracturadas y todo un sistema de lagunas de origen, glacial distribuidas cerca de la divisoria de aguas, a lo largo de las vertientes.

- *Cuenca media (2.300 – 2.900 m.s.n.m.)*

Está constituida por una litología de rocas sedimentarias (lutitas, areniscas, arcillitas, etc.) que han favorecido la meteorización del material, dando origen a un relieve de colinas. En este sector de la cuenca, el escurrimiento superficial se hace más intenso, producto de las altas precipitaciones, disminución de pendientes, una cobertura vegetal que en algunos casos ha sido deforestada, todo esto origina hilillos de agua y surcos propensos a formar cárcavas, favoreciendo la alteración del material y produciendo movimientos de masa como la reptación y en menor proporción la soliflucción y desprendimientos, algunos ya recolonizados.

- *Cuenca baja (1.400 – 2.300 m.s.n.m.)*

Los agentes externos se intensifican con respecto a la cuenca media, observándose condiciones de quiebres bruscos de pendientes. precipitaciones altas, recepción de aguas provenientes de las partes superiores de la cuenca, formaciones geológicas como la Mucujún y El Valle, de fácil alteración litológica, las cuales acentúan los procesos geomorfológicos, produciendo movimientos en masa como la soliflucción, reptación, terracetos y desprendimientos.

2.3.2.- Relieve

El área de estudio, a pesar de ser relativamente pequeña, presenta valores altitudinales que fluctúan entre 1.400 m.s.n.m., en su confluencia con el río Chama y los 4.400 m.s.n.m. en la Sierra de la Culata, presentando una diferencia altitudinal de 3.000 metros, que relacionados a la longitud del Río Mucujún de 31 Km., da una pendiente media aproximada del 10 %. La cuenca presenta una topografía bastante accidentada, con predominio de pendientes fuertes a muy fuertes. en el sector de vertientes del conjunto montañoso y de colinas. con valores que fluctúan entre el 30 y el 50 %, y de pendientes suaves a moderadas en las acumulaciones cuaternarias, cuyos valores oscilan entre el 10 y el 20 %. Así mismo presenta taludes en los bordes de los depósitos que van desde 10-20 metros y mayores.

2.4.- Suelos

En la Cuenca del Mucujún afloran una serie de formaciones geológicas originadas en períodos y ambientes diferentes, con variada composición litológica y mineralógica que constituyen el material parental de los suelos y por lo tanto influyen en las características físicas y químicas de los mismos. Desde este punto de vista la Formación Sierra Nevada incorpora a los suelos un alto contenido de arena y moderado o bajo porcentaje de limos y arcillas, confiriéndole a los suelos una textura franco arenosa, con una consistencia friable, ligeramente adherente, no plástica y de buena permeabilidad.

Los depósitos del cuaternario restringidos al fondo de valle, están constituidos básicamente por material proveniente de la Formación Sierra Nevada. Sin embargo, y como consecuencia de las bajas pendientes y el carácter granular de

estas, los suelos tienden a presentar un mayor desarrollo, haciéndolos aptos para un racional aprovechamiento agrícola (OFIPLAN; 1.982, citado por García 1.996).

La Formación Palmarito, cuya composición litológica es de lutitas, limos y arenas, da a los suelos un porcentaje considerable de arcillas. Para los suelos desarrollados de rocas de esta formación se obtiene como resultado una consistencia moderadamente friable en húmedo y fuerte en seco, adherencia de moderada a fuerte, alta plasticidad y baja permeabilidad.

Las Formaciones Colón y Capacho son las que cubren mayormente la superficie de la cuenca. La primera esta integrada por lutitas negras que le aportan al suelo contenidos de fragmentos de rocas (areniscas) y bajo a moderado porcentaje de concreciones ferromagnéticas, y muy abundante contenido de caolinita y vermiculita, con tendencia a clorotizarse. Las lutitas incorporan alto contenido de arcillas, que le confieren al suelo textura arcillosa y franco arcillo arenosa, consistencia firme en húmedo, plasticidad y adherencia cuando el suelo esta mojado y permeabilidad moderada.

La segunda está compuesta de lutitas y calizas duras que le aportan al suelo moderados porcentajes de cuarzo, fragmentos líticos de arenisca, que se intercalan con lutitas. Esto permite que los suelos faciliten el aumento de la velocidad de infiltración y hacerlos mas resistentes a la erosión, pero a la vez los contenidos de cuarzo disminuyen aun mas los niveles de saturación de bases. La distribución de los tipos de suelos en la cuenca se encuentra de la siguiente manera:

Cuenca Alta, con pendientes de 30-50 %, no están determinados, dominio de afloramientos rocosos, Cuenca Media, una mezcla de entisoles con inceptisoles, con pendientes de 20-40 % y Cuenca Baja. entisoles, con pendientes de 10-20 %.

2.5.- Hidrología

Hidrológicamente, la cuenca hace un arco conformado por los páramos de Tucaní, al NO, de Pan de Azúcar, al NE, y del Escorial al SE; su longitud promedio es de 31 Km, y la pendiente media del cauce es del 10 %. Los afluentes mas importantes se encuentran en la margen derecha y en orden descendente de importancia son las quebradas Las Verdes, La Torre, Ovalles, La Vergara, La Valencia, El Arado, El Robo, destacando La Cuesta como el tributario mas importante. En las nacientes de algunas quebradas esta presente un sistema de pequeñas lagunas de origen glacial, destacando los sistemas de Las Verdes, La Vergara y La Cuesta. En la margen izquierda sobresalen las quebradas Los Jabillos, La Asunción, Caño Hondo, La Bolsa y La Barrosa por encima de la cota de los 2.600 m., mientras río abajo fluyen numerosos arroyos.

3.- MÉTODOLÓGÍA

3.1.- Métodos de Digitalización

Como el área en estudio se localiza dentro de los extremos de las cartas cartográficas 5941, 5942, 6041 y 6042 a escala 1/100.000 del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), se seleccionó el segmento de la carta 6042 con 136 km² (Figura 2), para evaluar y comparar los diferentes métodos de digitalización, sin embargo, como el método de Tableta es directo sobre la carta se tuvo que ampliar la escala a 1/50.000 para mejorar el nivel de detalle entre curvas de nivel, ya que en la escala original es muy difícil digitalizarla.

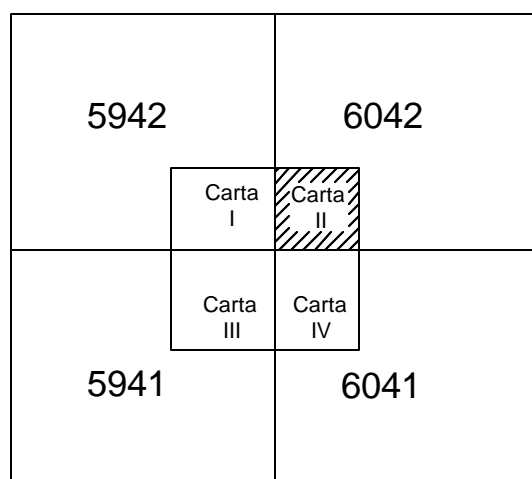


Figura 2. Ubicación del área en estudio dentro de las Cartas del IGVSB a 1:100.000

3.1.1.- Método de Pantalla

El la ejecución de este método se utilizó el software Cartalinx para generar los archivos vectoriales de curvas de nivel y drenajes. Para ello fue necesario obtener una imagen raster georreferenciada del documento original, definir las tolerancias y crear las entidades gráficas (Figura 3).

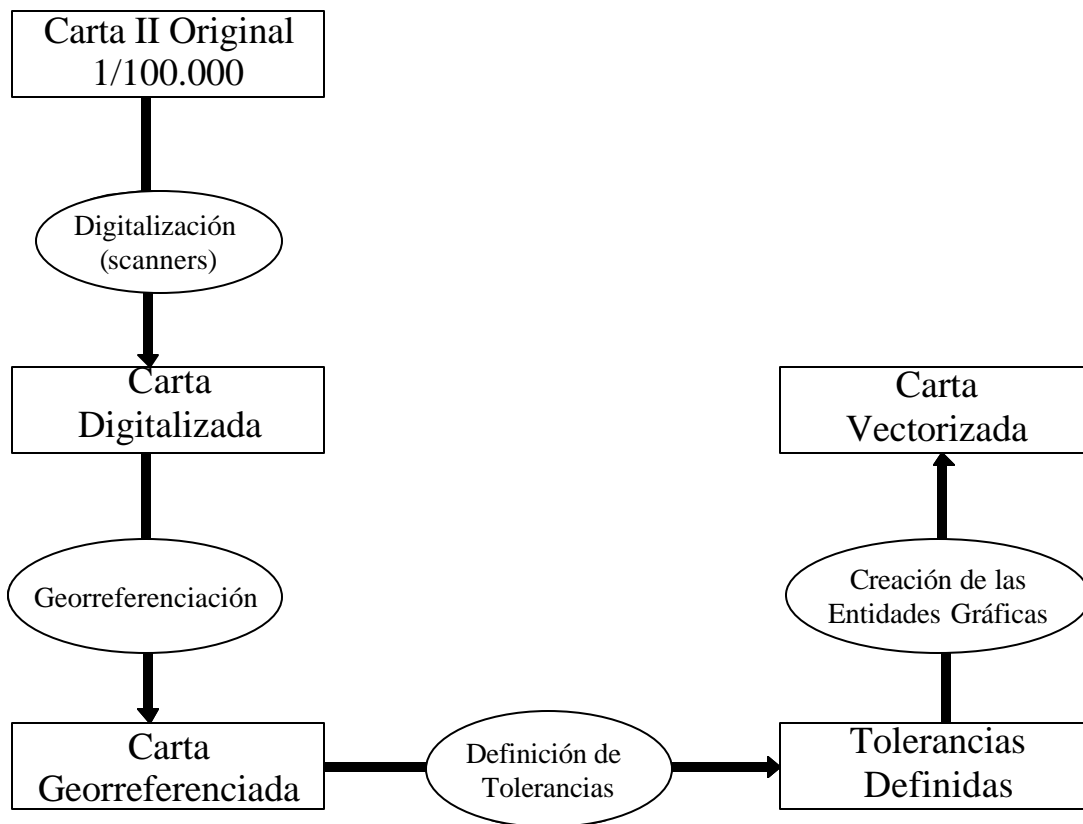


Figura 3. Procedimiento empleado para digitalizar en pantalla.

- *Digitalización del documento original a través del scanner:*

Para la creación del archivo raster (Carta II), se consideró una resolución de 300 puntos por pulgadas (dpi), ya que la misma brinda una buena visualización entre las curvas de nivel que se encuentran a 40 m de equidistancia, ello originó que a escala 1 / 100.000 cada píxel midiera en el terreno 8,46 m.

El proceso de digitalización se realizó a través del programa Lview Pro 2.8 enviando el resultado a un archivo de formato Tiff.

- *Georreferenciación de las cartas:*

El archivo Tiff producto del escaneo está referenciado bajo un sistema de coordenadas de imagen, por lo que se tuvo que realizar un proceso de

georreferenciación para llevarlo a un sistema de coordenadas reales (UTM), para ello se utilizó el sistema de información geográfica (SIG) IDRISI 32, con el cual se importaron las imágenes Tiff y se ubicó en ellas 7 puntos de control, de manera uniforme en toda la carta y hacia sus extremos, para obtener un mayor control de la geometría del mapa. En cada punto de control se obtuvieron las coordenadas reales (mapa) y las coordenadas de la imagen, según se indica en el Cuadro 1. Aplicando el comando RESAMPLE en Idrisi se georreferenció la imagen, obteniéndose la raíz del error medio cuadrático (REMC) de posición para cada punto y un total, indicados en el Cuadro 1.

Puntos	Imagen		UTM		REMC(m)
	x	y	X Este (m)	Y Norte (m)	
1	008,531812	1028,291833	280.000	976.000	2,144697
2	242,326546	1021,206395	284.000	976.000	0,478251
3	240,925000	0550,162400	284.000	972.000	0,792954
4	239,487440	0313,097021	284.000	968.000	0,733932
5	236,533307	0077,046053	288.000	964.000	1,119223
6	000,230970	0079,139504	284.000	960.000	0,549615
7	002,998279	0314,826434	280.000	964.000	2,373976
				Total	1,309675

Cuadro 1. Coordenadas y REMC registrados durante la georreferenciación de la imagen.

- *Definición de las tolerancias:*

Uno de los elementos importantes durante la creación de las entidades gráficas se refiere a las tolerancias, las cuales se escogen al principio de este proceso y va a depender principalmente de la escala de trabajo (1:100.000): Para nuestro caso tenemos que la tolerancia de unión de los nodos colgantes fue de 25 m, de los vértice que conforman cada línea 10 m y la selección de atributos 50 m.

- *Creación de las entidades gráficas:*

Después de haber seleccionado las tolerancias se desplegó la imagen georreferenciada que se utilizó de fondo para generar los archivos vectoriales de curvas y drenajes, a través de un proceso interactivo, utilizando el Zoom más apropiado y los comandos de principio, fin y propiedades de arco, se procedió a delinear encima de las curvas de nivel de la imagen los vectores con su respectiva cota, de igual forma se realizó con los drenajes pero sin las cotas. Ambos archivos fueron guardado por separados bajo la extensión .lnx.

El procedimiento de georreferenciación, definición de tolerancia y creación de entidades graficas se detalla en el Apéndice A.1 .

3.1.2.- Método de Tableta

El procedimiento de la digitalización por tableta consistió en colocar la Carta II (ampliada a escala 1/50.000) sobre la tabla digitalizadora, establecer los puntos de control para orientar la tableta, definir las tolerancias, generar las entidades graficas (vector) y editar esta ultima para obtener los archivos definitivos en formato digital (Figura 4).

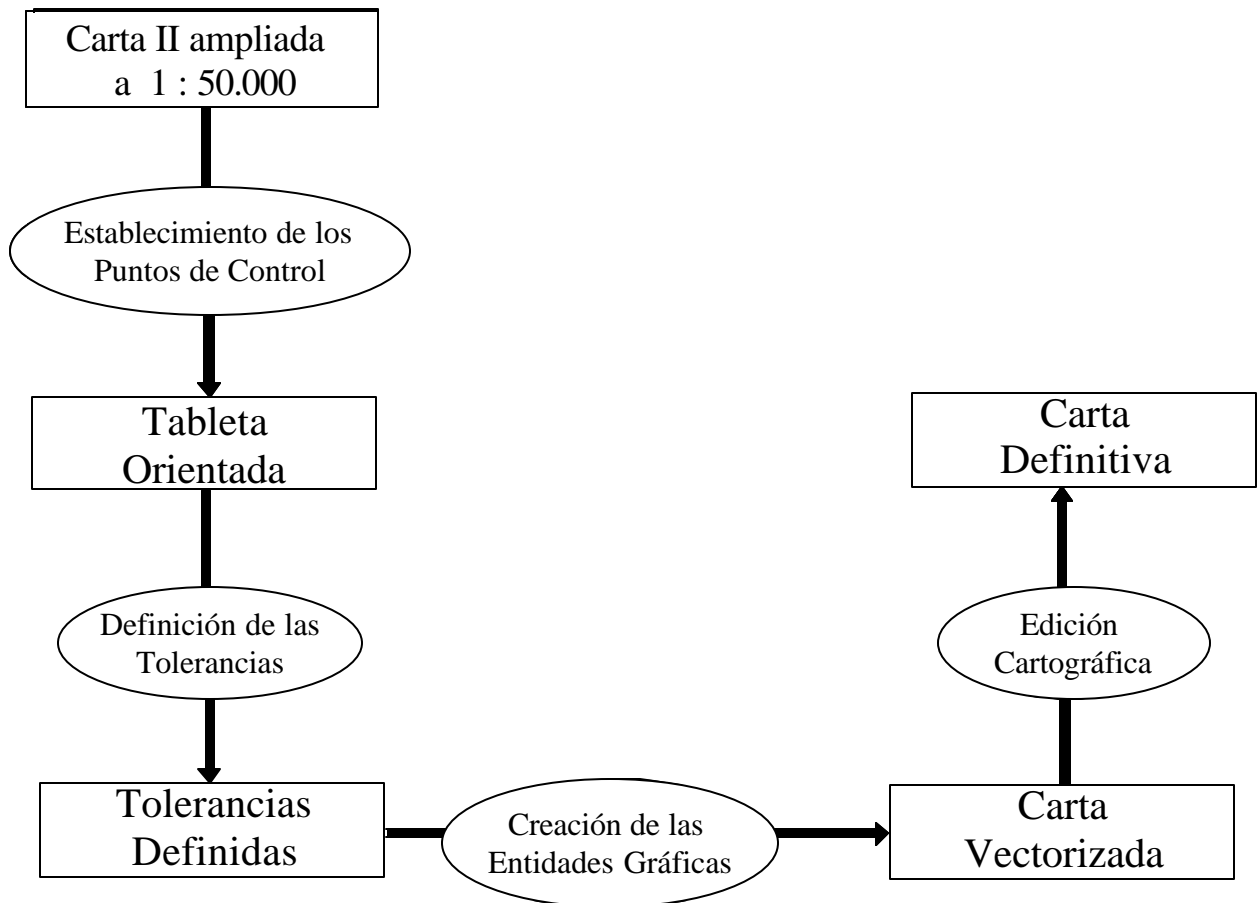


Figura 4 Procedimiento empleado para digitalizar en pantalla.

- *Establecimiento de los puntos de control:*

Después de introducidas las tolerancias al sistema se procedió a establecer siete (7) puntos de control en forma uniforme en toda la carta para orientar la tableta, esto generó una REMC y para cada punto. Como esta digitalización fue realizada en tres secciones, se utilizó los mismos puntos de control para cada una de ellas, sin embargo cada vez que se orientaba la tableta se determinaba la raíz del error medio cuadrático (Cuadro 2).

Puntos	Norte (m)	Este (m)	REMC1 (m)	REMC2 (m)	REMC3 (m)
1	976.000	280.000	4,144697	5,342658	3,654328
2	976.000	284.000	2,478251	3,345689	1,235805
3	972.000	284.000	2,792954	3,801292	3,023489
4	968.000	284.000	2,733932	3,632879	2,253648
5	964.000	288.000	3,119223	4,009898	3,126453
6	960.000	284.000	2,731851	3,645004	4,256812
7	964.000	280.000	4,373976	5,234586	3,984652
Totales			3,196412	4,144572	3,07645

Cuadro 2. Coordenadas y REMC registrados en la digitalización en tableta.

Estos errores fueron aceptados ya que la tableta digitalizadora usada en el laboratorio opera con una precisión de 0,005 pulg. es decir, de 0,127 mm, que a la escala de trabajo (1: 50.000), nos representa 6.35 m como tolerancia máxima permitida y las REMC son inferiores a ésta, sin embargo, para efecto de comparación se tomará el de mayor valor.

- *Definición de las tolerancias:*

Las tolerancias utilizadas para este procedimiento son las mismas que las utilizadas en el método de pantalla: unión de los nodos colgantes 25 m, la tolerancia de línea 10 m y la tolerancia de selección de atributos 50 m.

- *Generación de las entidades gráficas (vector):*

Este procedimiento consistió en desplazar el cursor de la tableta por cada una de las curvas de nivel y drenajes que conforman el mapa, las coordenadas de estos elementos quedaron registradas automáticamente en el computador y dibujadas gráficamente en la pantalla del mismo.

- *Edición de los vectores:*

El proceso de edición de vectores consistió en revisar las curvas de nivel que no se cruzarán entre sí y en asignarle la cota a cada curva, por otro lado en el archivo de drenaje en eliminar todos los nodos colgantes, así como también unir aquellos arcos que no se encontraban unidos y que en el mapa lo estaban.

3.1.3.- Método Semi – Automático y Automático

Para la utilización de estos métodos se necesitó generar y georreferenciar una imagen raster del documento original, tal y como se realizó con el primer método (Pantalla). Dicha imagen se procesa y es puesta de fondo en la pantalla para generar los archivos vectoriales en forma semi-automática y automática, rastreando los píxeles de igual color de manera interactiva o automática, para generar encima de ellos la capa vectorial (Figura 5).

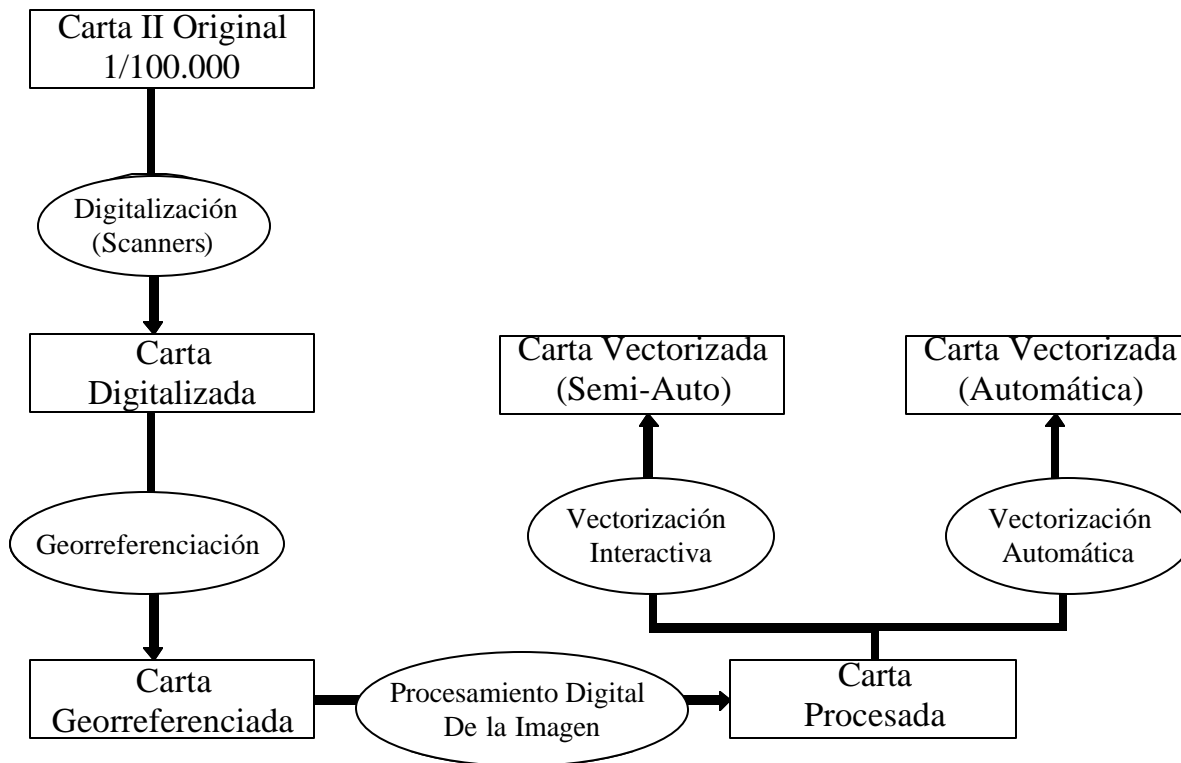


Figura 5. Procedimiento empleado para digitalizar en forma Semi-Automática y Automática.

De estos métodos existen varias alternativas, de las cuales fueron exploradas las siguientes: para el Semi – Automático el modulo “Interactive Line – Following” de TNT MIPS 6.5, CAD Overlay 2000i y R2V; y para el Automático el modulo “Convert/ Raster to Vector/ Auto – Trace” de TNT MIPS 6.5. En todas se necesita realizar un procesamiento previo a la imagen.

Cada una de estas alternativas trae internamente comandos para procesar la imagen, pero estos no resultaron efectivos, ya que las imágenes escaneadas contienen mucha información como carreteras, curvas de nivel, drenajes, toponimia, cuadrículas, y otras, que se representan por píxeles que no van a tener exactamente el mismo color, sino que aparecen bajo un efecto gradiente. “Es decir, el color de los píxeles de los bordes de las líneas es más claro y menos saturado que el de los píxeles centrales, aun presentando un tinte similar” (Fernández, López y Riveiro 2000). Por otra parte el documento no debe presentar manchas, dobleces ni rotos, ya que estos se reflejan a la hora de ser digitalizados bajo el “escáner” quedando registrados como información adicional que entorpecen el procedimiento.

En la actualidad existen grupos de investigación que están tratando de solventar estos problemas, algunos ya han generado programas especiales, tal es el caso del Grupo de Procesado de Imágenes (GPI) de la Universidad de Vigo (2002), que originó el Entorno de Vectorización Automático y Levachkine (2000) quién creo una serie de algoritmos para el tratamiento digital de la imagen con fines de digitalización automatizada de mapas raster, así como también se han realizado trabajos especiales de grado a nivel de Maestría en la automatización de líneas sobre mapas raster (Decelis, 2001).

Los programas para la vectorización de imágenes raster tienen diferentes algoritmos para el procesamiento de las imágenes, pero, todos con el mismo enfoque: generar una imagen binaria por cada capa de información, sin ruidos, donde el elemento que la conforma, como las curvas de nivel, estén realmente conectados entre sí y que no existan ningún otro tipo de elemento dentro de ella. De esta manera cualquier algoritmo que se genere para la vectorización de mapas raster, bien sea de manera Semi – Automática o Automática, siempre va a obtener buenos resultados.

Para efecto de este trabajo se utilizaron CAD Overlay 2000i y TNT MIPS 6.5, para los métodos Semi – Automático y Automático, respectivamente. El único resultado utilizado para la comparación entre los métodos de digitalización fue el Semi – Automático ya que no fue posible obtener resultados aceptables con el procedimiento Automático, debido a que no fue posible una correcta binarización de la imagen. Entre las causa estaría la baja calidad del material base escaneado,

resolución inapropiada de la imagen raster, insuficiente saneamiento digital de la imagen.

3.1.3.1.- Método Semi – Automático (CAD Overlay 2000i)

- Digitalización del documento original a través del scanner:

En este método se digitalizó la imagen con una resolución de 400 dpi, distinta a la utilizada en pantalla que fue de 300 dpi, dicho cambio se debe a la exigencia de este método para diferenciar los píxeles con mayor detalle.

- Georreferenciación de las cartas:

De igual manera que en el método de pantalla se georreferenció la imagen en IDRISI 32, y se obtuvo los siguientes resultados en el Cuadro 3:

Puntos	Imagen		UTM		REMC (m)
	x	y	X Este (m)	Y Norte (m)	
1	002,07348	704,72045	280.000	976.000	1,025349
2	473,86823	711,86732	284.000	976.000	0,569217
3	944,17549	717,96409	284.000	972.000	0,649834
4	947,64374	481,20291	284.000	968.000	0,872291
5	950,53023	243,36050	288.000	964.000	1,064824
6	008,00006	231,22824	284.000	960.000	0,436872
7	005,96515	467,89031	280.000	964.000	2,587133
				Total	1,046341

Cuadro 3. Coordenadas y REMC registrados en la digitalización semi - automática.

- Procesamiento Digital de la Imagen:

Una vez georreferenciada la imagen se exportó bajo el formato GeoTiff y se insertó en CAD Overlay 2000i georreferenciada, allí se empezó a procesar, transformándola a escala de grises con el comando “Change color Depth” y con el comando “Histogram” se procedió a darle contraste y brillo hasta que se obtuvo la tonalidad precisa (Figura 6).

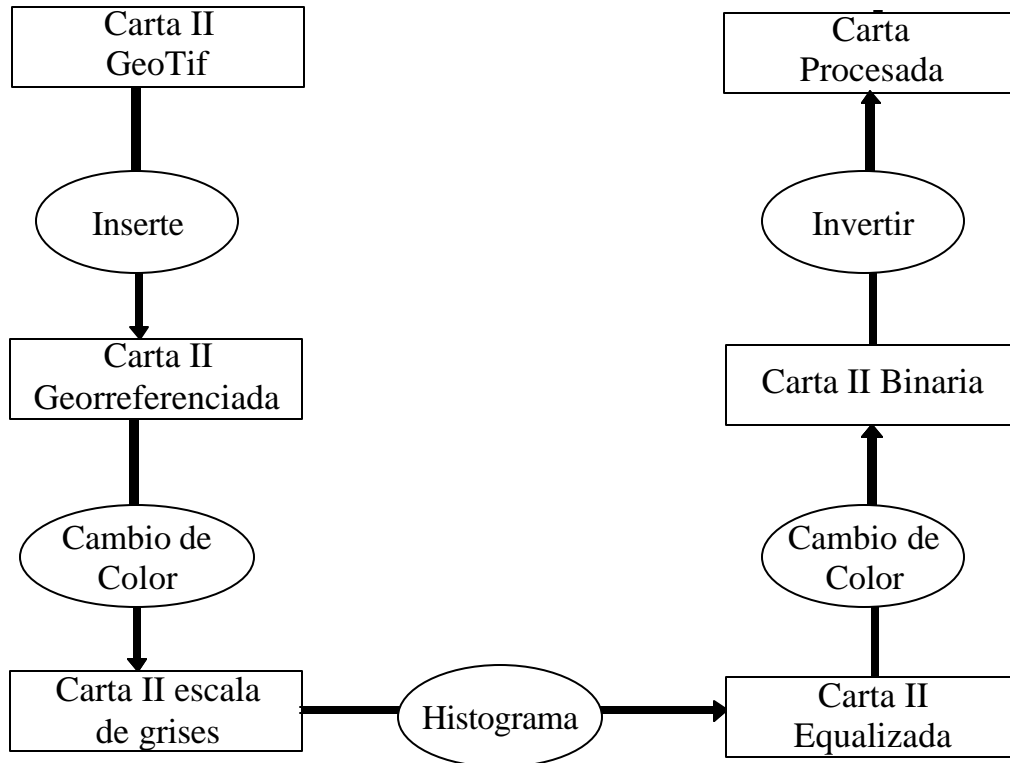


Figura 6. Procesamiento de la imagen en CAD Overlay 2000i.

- Generación de las entidades gráficas (vector):

Luego de estar preparada la imagen se procedió a digitalizarla, como eran curvas de nivel, se llevó a cabo mediante el comando “Contour Follower”, para ello se seleccionó el píxel de arranque y se procedió a remontar el vector, una vez remontado el vector se procedió a añadirlo, en este caso el vector desplaza totalmente la curva raster en cada procedimiento.

En el Apéndice A.2 se muestra con mayor detalle el procesamiento de la imagen y la generación de las entidades gráficas.

3.1.3.2.- Método Automático (TNT MIPS 6.5)

Este método es similar al Semi – Automático, pero con la salvedad de que el procesamiento digital de la imagen debe ser riguroso más detallado y el proceso de la creación de las entidades gráficas no es interactivo sino de manera

automática, es decir, que el sistema mismo se encarga de generar el archivo vectorial encima de la imagen procesada (Figura 4).

El procedimiento se realizó a través del módulo “Convert/ Raster to Vector/ Auto – Trace” de TNT MIPS 6.5, sin embargo, como en el Semi – Automático, la carta se georreferenció en IDRISI 32 y se exportó como GeoTiff. Una vez en que el TNT MIPS se importará dicha imagen se procedió a procesarla de la siguiente manera (Figura 7):

- *Selección de la muestra:* este procedimiento consistió en seleccionar las muestras de la imagen que fueron utilizadas posteriormente para la clasificación, las muestras fueron cuatro: fondo de la imagen, curvas de nivel, drenaje y texto.
- *Clasificación:* con la muestra seleccionada se clasificó la imagen mediante el módulo de “Auto Classify”.
- *Binarización:* después de clasificada la imagen se obtuvieron de ella dos imágenes binarias, una de curvas de nivel y a la otra de la red de drenaje, todo esto mediante el filtro de binarización.
- *Adelgazamiento de línea:* sobre las imágenes binarizadas se obtuvieron líneas muy gruesas que al aplicarle el algoritmo de automatización en dichas líneas raster generarían doble líneas vectoriales, fue por ello que se le aplicó este algoritmo para evitar este problema.
- *Automatización de Línea:* después de haber procesado la imagen se procedió a automatizar la línea, mediante la transformación de la imagen raster a vectorial.

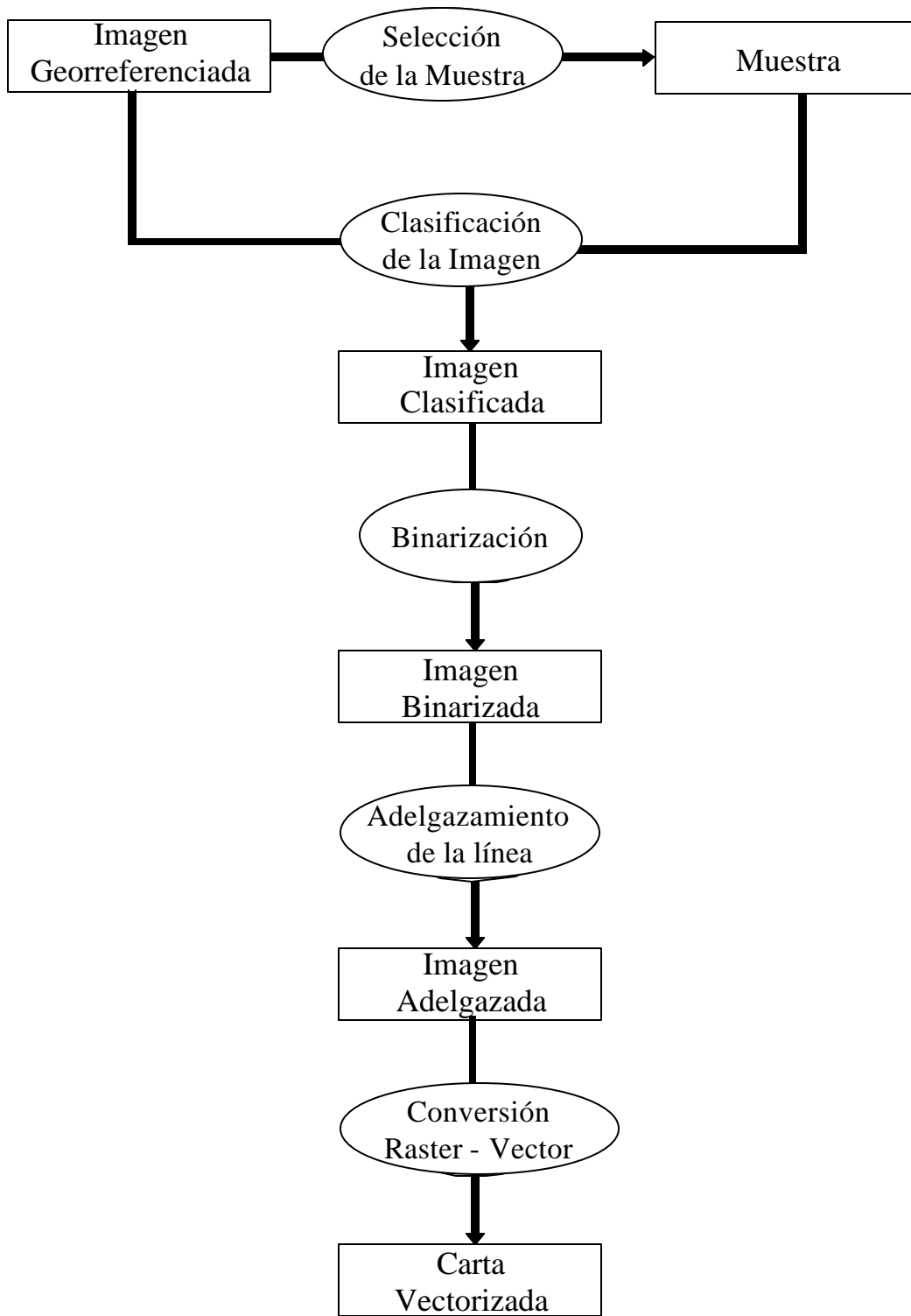


Figura 7. Procesamiento y vectorización digital de la imagen.

3.1.4.- Criterios de Comparación entre los métodos de digitalización:

La comparación entre métodos de digitalización se sustentó en el tiempo neto efectivo para obtener un archivo vectorial y en la fidelidad para la reproducción de las curvas originales. Este último aspecto se evaluó gráficamente y estadísticamente mediante sus coordenadas (error de coordenadas).

Gráficamente, mediante la visualización conjunta de las curvas digitalizadas y del mapa original, y estadísticamente calculando la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC) entre las coordenadas de los archivos vectoriales generados y los correspondientes en el mapa original.

3.1.4.1.- Selección de puntos de control para determinar la REMC:

Se adoptó como criterio de selección de los puntos de control las intersecciones entre los drenajes y las curvas de nivel (Figura 8), tanto en la imagen digitalizada como en el mapa original

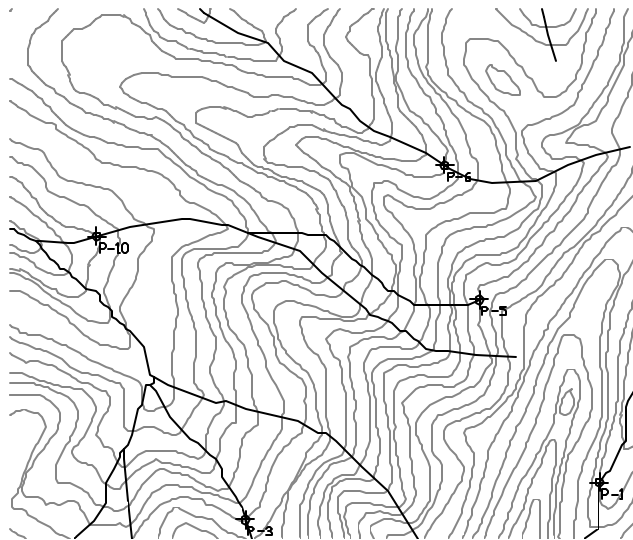


Figura 8. Algunos puntos de control obtenidos a través de la intersección de las curvas de nivel y los drenajes digitalizados.

Como la carta digitalizada tiene suficientes drenajes en cada cuadrícula del sistema de coordenadas, se decidió obtener 6 puntos de control por cuadro, lo que originó 51 puntos de control, suficientes para el área total digitalizada (136 km²).

Los puntos de control se obtuvieron de la imagen raster georreferenciada, generada de la carta original, ya que del mapa a 1 / 100.000 o de la ampliación a 1 / 50.000 la precisión de la toma de los puntos no es muy exacta debido al poder de resolución visual. Asumiendo una precisión máxima de 1 mm esto representaría 100 m para 1 / 100.000 y 50 m para 1 / 50.000.

El procedimiento se automatizó en Auto Cad 2000i. La imagen se exportó de IDRISI 32 a AUTO CAD 2000i, allí se originó una capa de puntos producto de la intersección de las curvas con los drenajes, de dicha capa se extrajeron las coordenada X, Y de cada punto mediante el módulo "EZYsurf", escribiéndose en un archivo de texto ASCII que posteriormente se exportó a una hoja de cálculo EXCEL para realizar los respectivos cálculos.

3.1.4.2.- Puntos homólogos en curvas y drenajes digitalizados:

Para obtener las correspondientes coordenadas de los puntos de control según el sistema vectorizado con cada método de digitalización se realizó el mismo procedimiento explicado anteriormente para obtener en forma automática las coordenadas en los puntos de intercepción, entre curvas y drenajes. En el Apéndice 3 se ilustra, mediante un ejemplo, el procedimiento para obtener los puntos de intercepción tanto en el mapa como en el archivo vectorial.

3.1.4.3.- Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC):

Para realizar el cálculo de la REMC utilizamos las coordenadas de los puntos de control X,Y (imagen raster georreferenciada) y las de los homólogos en los archivos vectoriales X,Y; según el esquema de la Figura 9 y aplicando la siguiente ecuación:

Ptos	Mapa raster		Vector		Rx(X-X')	Ry(Y-Y')	Rx ²	Ry ²
	X	Y	X'	Y'				
1								
2								
3								
"								
"								
"								
n								
							$\sum Rx^2$	$\sum Ry^2$

Figura 9. Puntos de control seleccionados y algunos cálculos para estimar la Raíz del Error Medio Cuadrático de la variable X, Y.

$$REM_{Ct} = \sqrt{(REM_{Cx})^2 + (REM_{Cy})^2} \quad (1)$$

$$REM_{Cy} = \sqrt{\frac{\sum Ry^2}{n}} \quad (2)$$

$$REM_{Cx} = \sqrt{\frac{\sum Rx^2}{n}} \quad (3)$$

REM_{Ct} = Raíz del Error Medio Cuadrático Total. (ecuación 1).

REM_{Cx} = Raíz del Error Medio Cuadrático en X. (ecuación 2).

REM_{Cy} = Raíz del Error Medio Cuadrático en Y. (ecuación 3).

X = Coordenadas Este de la Imagen raster georreferenciada.

Y = Coordenadas Norte de la Imagen raster georreferenciada.

X' = Coordenadas Este de la intersección de las Curvas y Drenajes Digitalizados.

Y' = Coordenadas Norte de la intersección de las Curvas y Drenajes Digitalizados

En el Apéndice A.3 se muestra los detalles de la metodología utilizada para evaluar estadísticamente los métodos de digitalización.

3.2.- Factores de Escala

Para la realización del siguiente objetivo se seleccionó la parte alta del área en estudio, enmarcada dentro de las coordenadas UTM, 966.000 – 976.000 m Norte y 272.000 – 284.000 m Este, cubriendo un área de 120 km² (cuadrícula de 10 km x 12 km). Se referencia según cartas cartográficas del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB) a escala 1 / 100.000 por las hojas 5942 y 6042, y a escala 1 / 25.000 por las hojas 5942-II-NE, 5942-II-SE, 6042-III-NO y 6042-III-SO (Figura 10).

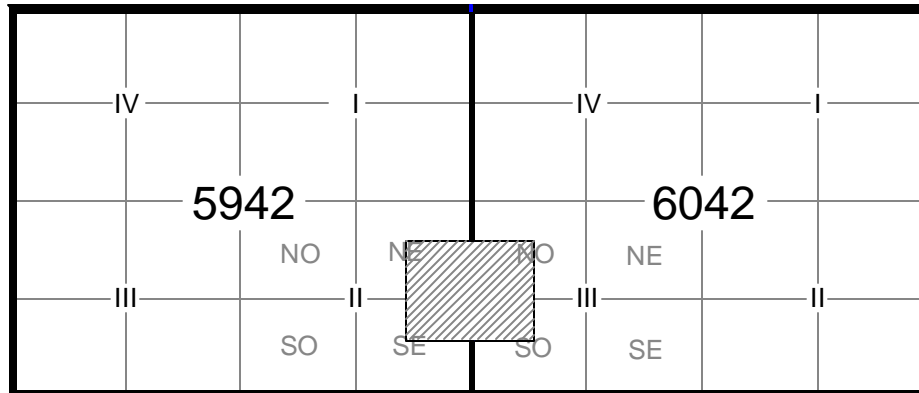


Figura 10. Ubicación cartográfica de la parte alta del área en estudio.

3.2.1.- Digitalización de las cartas topográficas:

Para digitalizar las cartas cartográficas del área en estudio se seleccionó el método de pantalla a través del software Cartalinx, mediante el cual se digitalizaron las cartas a 1/100.000 y a 1/25.000 con equidistancia entre curvas de nivel de 40 y 20 m, respectivamente.

Como se digitalizó en ambas escalas la misma zona, se realizó un análisis comparativo para cuantificar el tiempo neto demorado en vectorizar las curvas y drenajes, así como también una comparación visual entre estos archivos, ello se realizó para las curvas de nivel cada 40 m.

3.2.2.- Evaluación de los efectos equidistancia entre curvas de nivel, tamaño de píxel y escala del mapa en la generación de los MDE

Para evaluar el efecto de la equidistancia entre curvas de nivel, tamaño de píxel del modelo raster y la escala del mapa en la generación de los MDE se seleccionaron los siguientes factores de escala: tamaño de píxel: 1, 10, 15, 20, 30, 50, 100 y 150 m, equidistancias entre curvas de nivel: 20, 40, 80, 120 y 200 m y escalas: 1 / 25.000 y 1 / 100.000 . la combinación de factores produjo 72 MDE según se indica en el Figura 11.

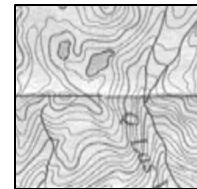
Escala del mapa	Equid. Entre CN (m)	Resolución de la Cobertura (m)							
		1	10	15	20	30	50	100	150
1 / 25.000	200	1	2	3	4	5	6	7	8
	120	9	10	11	12	13	14	15	16
	80	17	18	19	20	21	22	23	24
	40	25	26	27	28	29	30	31	32
	20	33	34	35	36	37	38	39	40
1 / 100.000	200	41	42	43	44	45	46	47	48
	120	49	50	51	52	53	54	55	56
	80	57	58	59	60	61	62	63	64
	40	65	66	67	68	69	70	71	72

Figura 11. MDE construidos con las diferentes equidistancia entre curvas de nivel, tamaño de píxel y escalas.

Para la evaluación del efecto de escala (Figura 12), se compararon los MDE construidos con un mismo tamaño de píxel y equidistancia entre curvas de nivel, pero a diferentes escalas.



1/25.000



1/100.000

Figura 12. Factor escala del mapa.

El efecto de equidistancia entre curvas de nivel se evaluó comparando los MDE generados con un mismo tamaño de píxel pero con diferentes equidistancia entre curva de nivel (Figura 13).

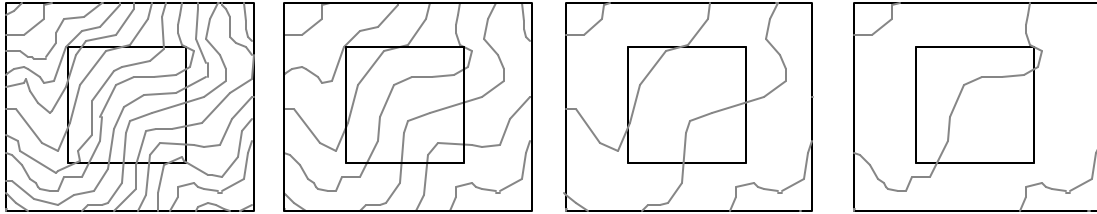


Figura 13. Factor equidistancia entre curvas de nivel.

De igual forma se compararon los MDE construidos con una misma equidistancia entre curva de nivel pero con diferentes tamaños de píxeles (Figura 14), esto permitió evaluar el efecto de la resolución del píxel en la construcción de los MDE.

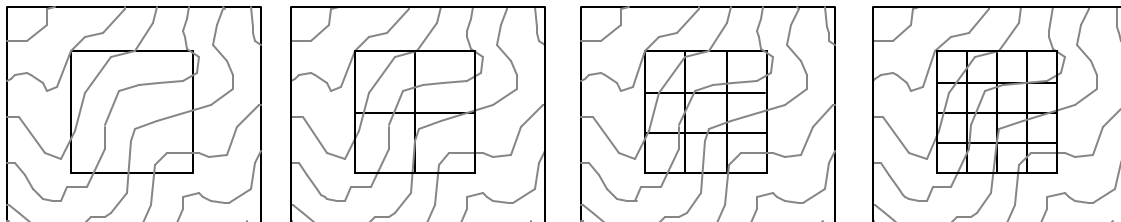


Figura 14. Factor tamaño del píxel o resolución del modelo raster.

3.2.3.- Método de interpolación para la generación de los MDE

Para construir los MDE, se aplicó el software ArcView 3.2 con sus extensiones 3D-Analyst y Spatial Analyst, el método de interpolación de Red Irregular de Triángulos (TIN), utilizado por Felicísimo (2001), para sus prácticas en la construcción de Modelos Digitales del Terreno. Se generaron modelos TIN a partir de archivos vectoriales de curvas de nivel y luego se transformaron a "grid" o modelo raster de diferentes resoluciones de píxel. En el Apéndice B.1 se muestra el procedimiento utilizado para construcción de los MDE.

3.2.4.- Criterios de evaluación

Se aplicaron dos criterios para evaluar y comparar los MDE, el primero es un criterio estadístico, la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC) y el segundo es un criterio hidrográfico.

3.2.4.1.- Criterio Estadístico:

Esquemáticamente se presenta en la Figura 15 el proceso metodológico del modelaje cartográfico en SIG para evaluar estadísticamente los MDE, allí se presenta a manera de ejemplo, una situación simplificada de una escala, dos equidistancia y dos resoluciones. Partiendo de un archivo de curvas digitalizadas se extraen dos coberturas con curvas de nivel cada 40 m y 80 m, esto se realizó diseñando un filtro. De cada archivo se generaron modelos TIN que fueron convertidos a raster con las resoluciones 30 y 100 m para cada caso.

Por otro lado, a través de las curvas digitalizadas se obtuvieron algunas cotas que junto con las homólogas de los MDE permitió calcular la REMC de la variable Z, para ello se diseñó una Rejilla con separación de 1 Km., la cual fue interceptada con las curvas digitalizadas, ello originó un tema de puntos de control distribuidos de una manera sistemática en todo el área de estudio con coordenadas reticulares UTM, ya que este resultado no tenían al valor atributivo Z se realizó un overlay con dicho tema de puntos y con el tema de curvas digitalizadas, esto generó que la base de datos del tema de puntos se obtuviese un nuevo campo con la cota cada punto, posteriormente este tema extrajo de manera automática en los MDE generados la cota en cada punto, para calcular la raíz del error medio cuadrático de cada MDE mediante las ecuaciones (Figura 16):

Ptos	Z	Z'	(Z - Z')	(Z - Z') ²
1				
2				
3				
“				
“				
“				
n				
			$\sum (Z - Z')$	$\sum (Z - Z')^2$

Figura 16. Esquema de cálculo de la REMC para la variable Z.

$$REMC = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum (Z - Z')^2} \quad (4)$$

Donde:

REMC = Raíz del Error Medio Cuadrático. (ecuación 4).

Z = Cota obtenida a través de la curva de nivel vectorizada.

Z' = Cota obtenida del MDE para el mismo punto.

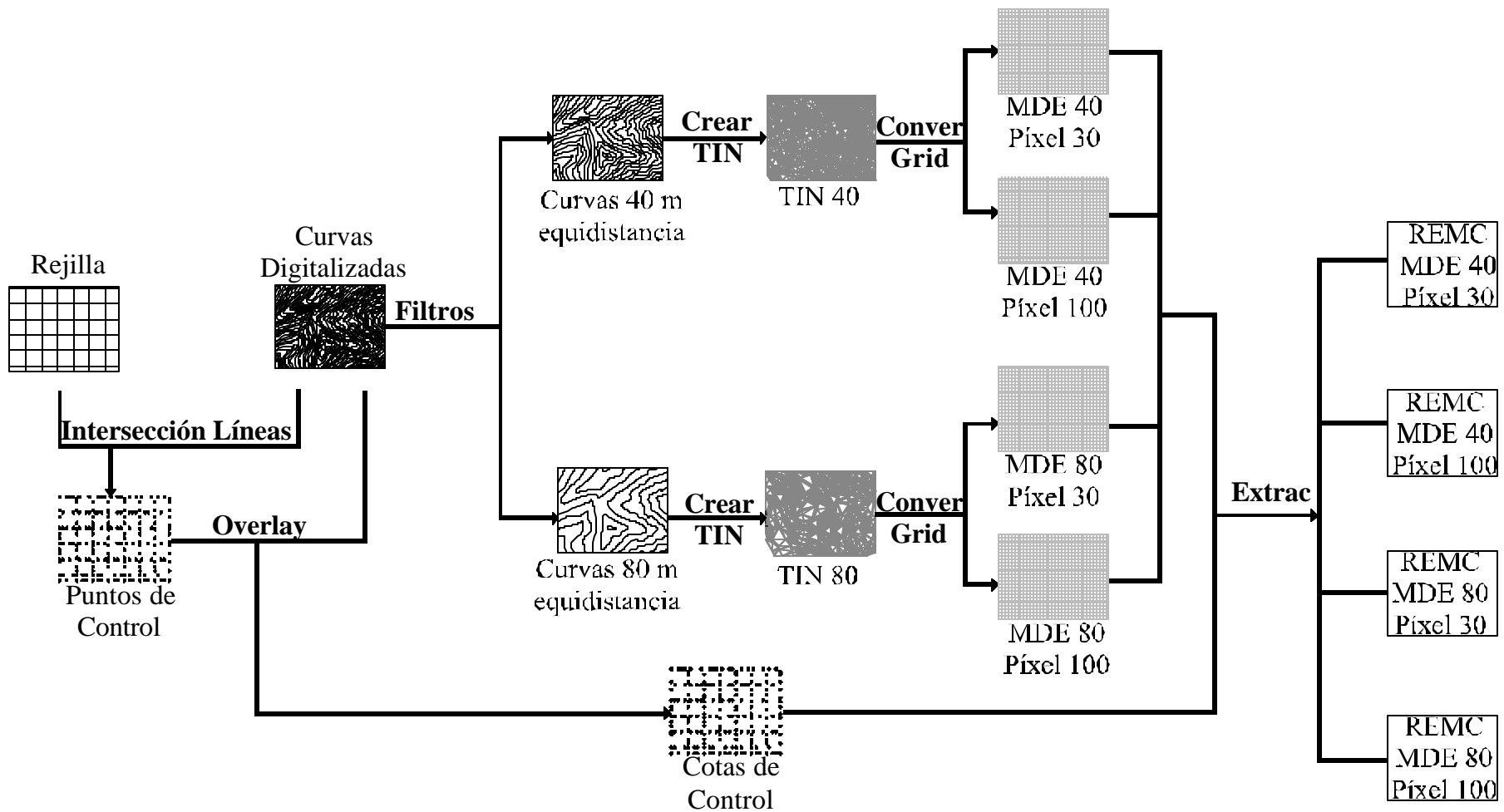


Figura 15. Esquema metodológico del modelaje cartográfico en SIG

Toda la metodología excepto, el diseño de los filtros, fue desarrollada en Arc View 3.2, a través de rutinas (script) específicas (ESRI: biblioteca de script).

En el Apéndice B.2 se detalla la extracción de los puntos de control en las curvas digitalizadas y los MDE para el cálculo de la REMC.

3.2.4.2.- Criterios Hidrográfico:

Para el diseño de la segunda metodología se utilizó un criterio hidrográfico el cual consistió en comparar la red drenaje del mapa (ya vectorizada), con la red de drenaje equivalente que se deriva de los MDE construidos. Este último se determinó aplicando la extensión CRWR-PrePro (Olivera, 1999). Dichos drenajes se superpusieron en formato vectorial, de los cuales se originaron pequeños polígonos que fueron contabilizados mediante el cálculo de sus áreas, como medida de desplazamiento entre las dos redes (Figura 17). El criterio de la mejor red drenaje generada, se basó en aquellos polígonos que arrojaron menores áreas.

El procedimiento para la generación de la red drenaje se explica en el Apéndice B.3, mientras que el procedimiento para determinar la medida de desplazamiento se explica en el Apéndice B.4.

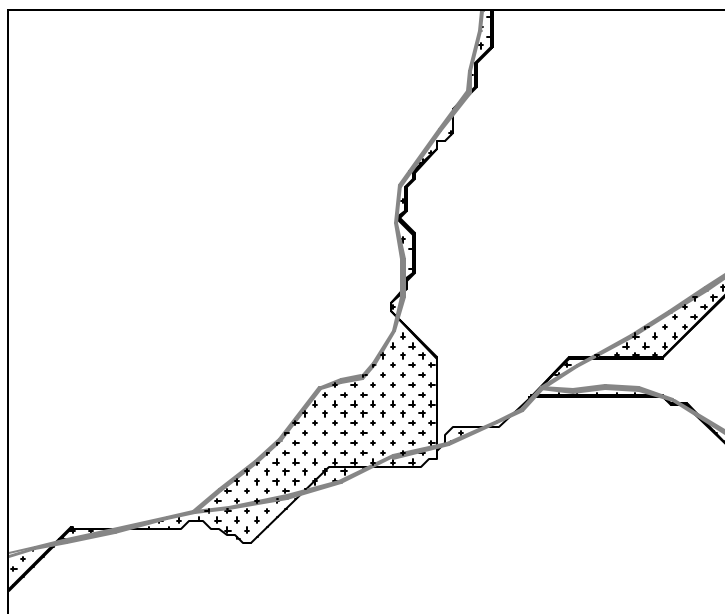


Figura 17. Medida del desplazamiento (área punteada) de la red hidrográfica generada (negra delgada) con la digitalizada del mapa original (gris gruesa)

Posteriormente se compararon visualmente los drenajes generados y se calcularon las Longitudes de cauces, para demostrar si existe o no diferencia en originar drenajes en los distintos MDE para un umbral determinado.

3.3.- Métodos de Interpolación

3.3.1.- Descripción de los Métodos de Interpolación

3.3.1.1.- TIN (Red de Triángulos Irregulares).

Según Geo Vectra (2002): “El método de Triangulación crea una imagen de superficie a partir de datos almacenados como puntos vectoriales, nodos, TIN o una base de datos. El método de Triangulación utiliza los puntos de entrada para construir una red de triángulos según el criterio de Delauny: en cada triángulo, el círculo que pasa a través de los tres vértices no encierra ningún otro punto de entrada (el criterio de Delauny genera, tanto como le es posible, triángulos pequeños y equiláteros y es ley ser utilizado para crear objetos TIN). Luego, el proceso ajusta una superficie plana a cada triángulo, de manera tal que el total de la superficie está modelada como una colección de facetas trianguladas planas”. (Figura 18).

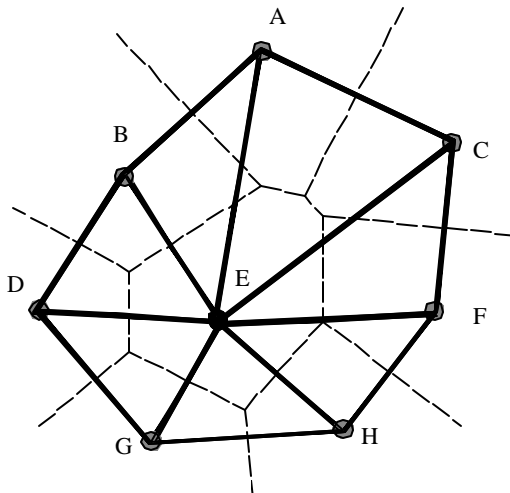


Figura 18. Red de Triángulos Irregulares (TIN) (Tomado de Aguilar, 2001).

3.3.1.2.- INTERCON (Interpolación Lineal).

Genera un modelo digital del terreno raster, mediante la interpolación de curvas de nivel digitalizadas. Utiliza una interpolación lineal entre curvas de nivel (Clark, 2001), que consiste en encontrar dos puntos pertenecientes a dos curvas de nivel contiguas, situadas en una dirección concreta del plano. De este modo, el punto no muestral tiene una altura intermedia entre las de las curvas, pero según se emplee una dirección u otra, la altura interpolada será ligeramente diferente, en el punto (Figura 19).

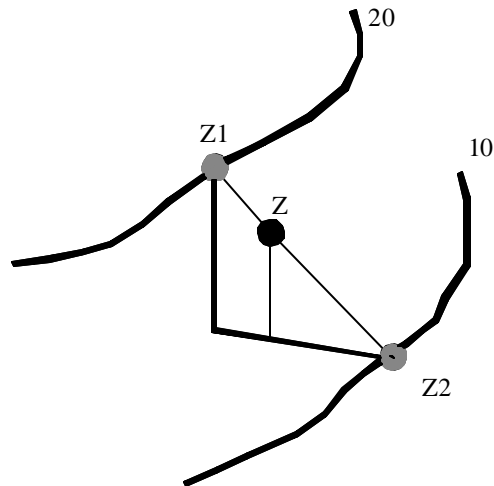
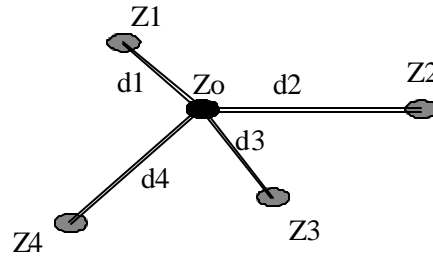


Figura 19. INTERCON (Interpolación Lineal) (Tomado de Aguilar, 2001).

3.3.1.3.- IDW (Interpolación ponderada por el Inverso de la Distancia).

Este método puede ser utilizado con objetos que contengan puntos o trazado de curvas o con base de datos u objetos TIN. Estima los puntos del modelo realizando una asignación de pesos a los datos del entorno en función inversa a la distancia que los separa del punto en cuestión, de esta forma se acepta que los puntos más próximos al centroide "z" intervienen de manera más relevante en la construcción del valor definitivo de altura para ese punto (Alcalá, 1997), Figura 20.

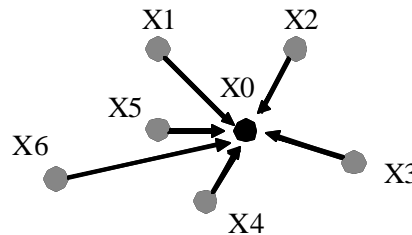


$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 \lambda_i z_i}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i} \quad \text{con } \lambda_i = \frac{1}{d_i^u} \quad u=1, u=2, \dots$$

Figura 20. IDW (Interpolación ponderada por el Inverso de la Distancia) (Tomado de Aguilar, 2001).

3.3.1.4.- Kriging.

Según Geo Vectra (2002): “Es un método que interpola un valor de elevación mediante el cálculo de un promedio de elevaciones de los puntos cercanos. Los puntos más cercanos son ponderados mucho mejor que puntos más distantes. El procedimiento kriging analiza la variación estadística en valores sobre diferentes distancias y diferentes direcciones determinando así la forma y el tamaño del punto del área seleccionada y la serie de factores predominantes que pueden provocar el mínimo error en la elevación estimada. Kriging puede ser utilizado con puntos vectoriales, TIN y bases de datos como objetos de entrada.” (Figura 21).



$$z(x_0) = \sum_{i=1}^6 \lambda_i z(x_i) \quad \rightarrow \quad z(x) = m(x) + r(x) + e$$

Componente determinístico $m(x)$
 Desviaciones con respecto a la media explicadas
 mediante correlación espacial $r(x)$
 Error no explicable mediante correlación espacial (e)

Figura 21. Método de Interpolación Kriging (Tomado de Aguilar, 2001).

3.3.1.5.- Spline (Interpolación Spline Regularizada y con Tensión).

Según Mitsova et al, (1993) citado por Sárkozy (1998), el spline suavizador regularizado o con tensión son métodos de funciones de base radial para la interpolación de los datos esparcidos. Los métodos de interpolación son flexibles, el parámetro de tensión y suavizador controla las propiedades de la función de interpolación. (Ecuación 5).

$$S(x) = T(x) + \sum_{j=i}^N \lambda_j R(x, x^{[j]}) \quad (5)$$

donde el índice j denota los puntos medidos
 λ_j los coeficientes de los desconocidos
 $R(x, x(j))$ las funciones base
para el caso relacionado $T(x) = a_1 = \text{constante}$

3.3.2.- Puntos acotados para la construcción de los MDE

Para la construcción y evaluación de los MDE se utilizaron las curvas de nivel digitalizadas cada 40 metros obtenidas a través de las cartas cartográficas a 1/100.000 con una superficie de 784 km² que abarcaba toda el área en estudio. De allí se extrajeron mediante un filtro dos archivos, uno con curvas cada 800 metros (1200, 2000, 2800, 3600 y 4400) que se utilizó como control para evaluar estadísticamente los MDE y el otro con el resto de las curvas para la construcción de los MDE. De este último archivo se originaron dos conjuntos de datos puntuales, mediante la reducción de vértices, la primera con una reducción de 20 metros que originó 51.781 puntos y la segunda con una reducción de 50 metros que originó 27.478 puntos (Figura 22), con estas bases datos se construyeron los MDE a través de los métodos de interpolación ya mencionados. En el Apéndice C.1 se describe con mayor precisión como se obtuvieron los puntos acotados y en el Apéndice C.2 la construcción de los MDE con los diferentes métodos de interpolación.

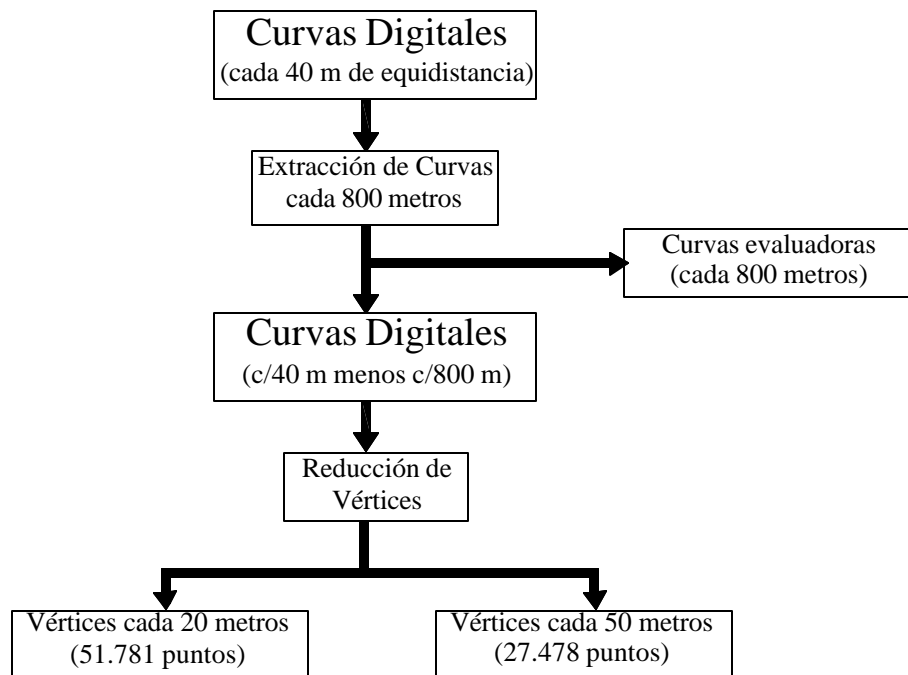


Figura 22. Determinación de puntos acotados para la generación de los MDE.

Esta reducción de vértice fue aplicada ya que las curvas digitalizadas en un principio originaron 330.549 puntos, cantidad muy grande para algunos métodos de interpolación que no funcionaron, debido principalmente a la capacidad del computador.

3.3.3.- Evaluación de los Métodos de Interpolación en la construcción de los MDE

Para la evaluación de los métodos de interpolación se asumieron tres criterios: estadístico mediante el cálculo de la Raíz del Error Medio Cuadrático (Ecuación 4), visual y morfométrico.

3.3.3.1.- Criterio Estadístico:

El criterio estadístico se basó en el cálculo de la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC), con 2720 puntos obtenidos de las curvas de control y sus homólogos en cada MDE construido de los datos de los puntos acotados y de los diferentes métodos de interpolación. (Figura 23).

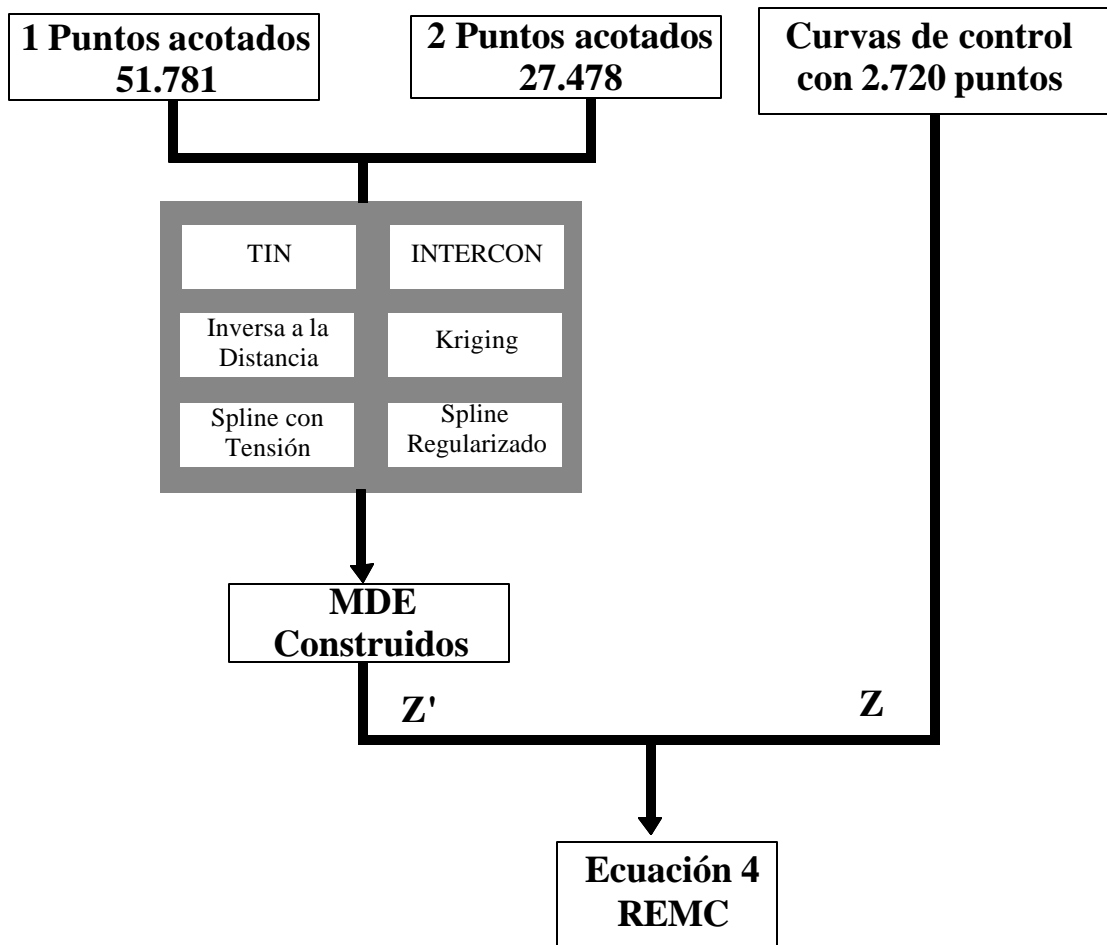


Figura 23. Cálculo de la Raíz del Error Medio Cuadrático para evaluar los MDE obtenidos mediante diferentes métodos de Interpolación.

En el paso 5,6,7 y 8 del Apéndice B.2 se explica el criterio estadístico planteado para la evaluación de los MDE obtenido mediante los diferentes métodos de interpolación.

3.3.3.2.- Criterio Visual:

Otra de las evaluaciones empleadas para corroborar la calidad de los MDE, se basó en el MDE que mejor generará las curvas de nivel cada 40 metros, para ello se utilizó los MDE obtenidos con los primeros puntos acotados (51.781 puntos). El

criterio de comparación fue visual comparándose con las curvas de nivel digitalizadas del mapa original.

3.3.3.3.- Criterios Morfométricos:

Los criterios morfométricos utilizado para evaluar los MDE fueron: delineación automática de la red hidrográfica y la divisoria de subcuencas , incluyendo el área y pendiente media de las subcuencas y la longitud total de cauces. La delineación de cauce y subcuencas se realizó aplicando el programa CRWR – PrePro (Olivera, 1999) y el cálculo de parámetros directamente aplicando las funciones propias de Arc View.

Los drenajes y divisorias generados a partir de cada MDE se compararon visualmente con los ríos y divisorias obtenidos del mapa topográfico, previa vectorización de los mismos, a tal efecto se definieron las divisorias de tres subcuencas sobre el mapa topográfico. Los otros parámetros se compararon numéricamente entre sí (Figura 24).

El criterio morfométrico diseñado para evaluar los métodos de interpolación se detallan en el Apéndice C.3.

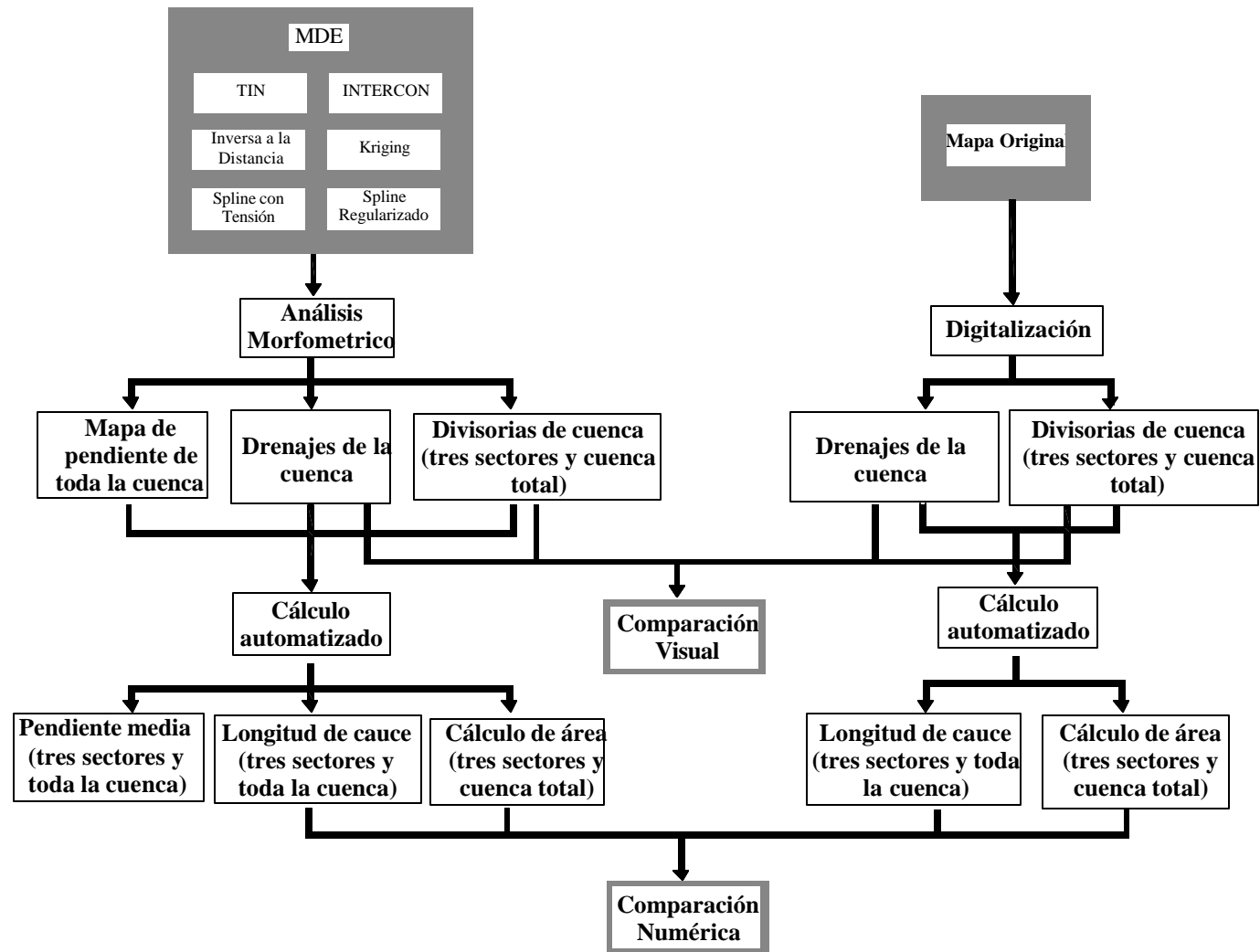


Figura 24. Criterios morfométricos para comparar los métodos de interpolación

4.- MATERIALES

- Cartas cartográficas del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB) a 1/100.000 N° 5941, 5942, 6041 y 6042 y 1/25.000 N° 5942-II-NE, 5942-II-SE, 6042-III-NO y 6042-III-SO.
- Software básico: IDRISI 32, Sufer 8, TNT Mips 6.5, Cartalinx, AtuoCad Map 2000i, CAD Overlay 2000i, EZYsurf, R2V, ArcView 3.2 y las rutinas Compiled Theme Tools (Herbold, 2003), gridstack (Buja, 2003) y CRWR-PrePro (Olivera, 1999).
- Hardware utilizado: PC Pentium IV Intel de 1.2 GHz, bajo Windows 2000, con 1 Gb en RAM y 80 Gb en disco duro, Scanners, Tableta digitalizadora e Impresora.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1.- Métodos de Digitalización

Los resultados comparativos del tiempo neto al digitalizar un segmento de carta a escala 1 / 100.000, con equidistancia cada 40 m y con un área de 136 km² mediante los métodos de Pantalla, Tableta y Semi – Automático se presentan en la Figura 25. Se observa que tanto en drenajes como en curvas de nivel, el menor tiempo se obtuvo con el método Semi – Automático, seguido por los métodos de Tableta y de Pantalla con poca diferencia entre estos últimos. Por otro lado con el método Semi – Automático el tiempo de Digitalización (vectorización) se reduce a la mitad o más en Tableta y Pantalla. A su vez el método de Pantalla es un 25 % más largo que el de Tableta.

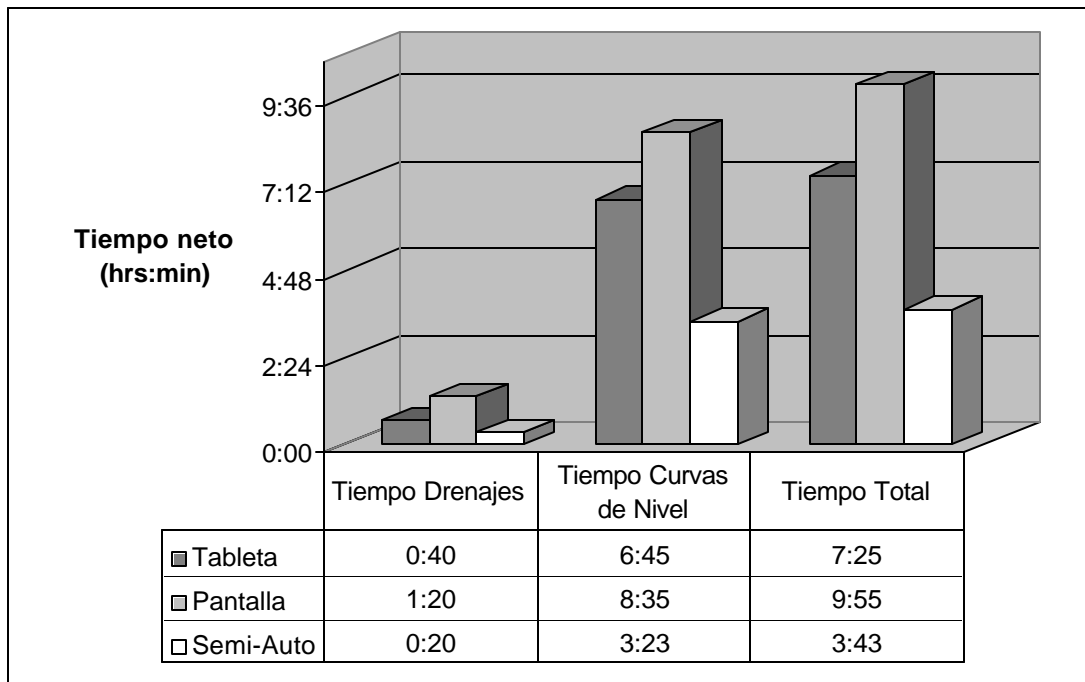


Figura 25. Tiempo neto registrado durante el proceso de Digitalización en sus tres métodos (Tableta, Pantalla y Semi – Automático).

Con Pantalla y Semi – Automático se obtuvieron los mejores ajustes visuales entre las curvas de nivel vectorizadas y los que subyacen en el mapa. El peor ajuste fue el logrado con la Tableta (Figura 26), a pesar de que se utilizó para su procedimiento una ampliación de 1 / 100.000 a 1 / 50.000 del mapa original. Esto se explica porque los errores humanos son mayores evidenciados con este método, ya que una vez que se realiza el seguimiento de la línea de manera manual, si se comete cualquier desviación de esta durante el proceso, es en la etapa de edición donde se corregirá, pero las líneas corregidas no serán tan fidedignas con las originales, ya que la corrección se hace en pantalla y no en la tableta, donde se encontraba el mapa original.

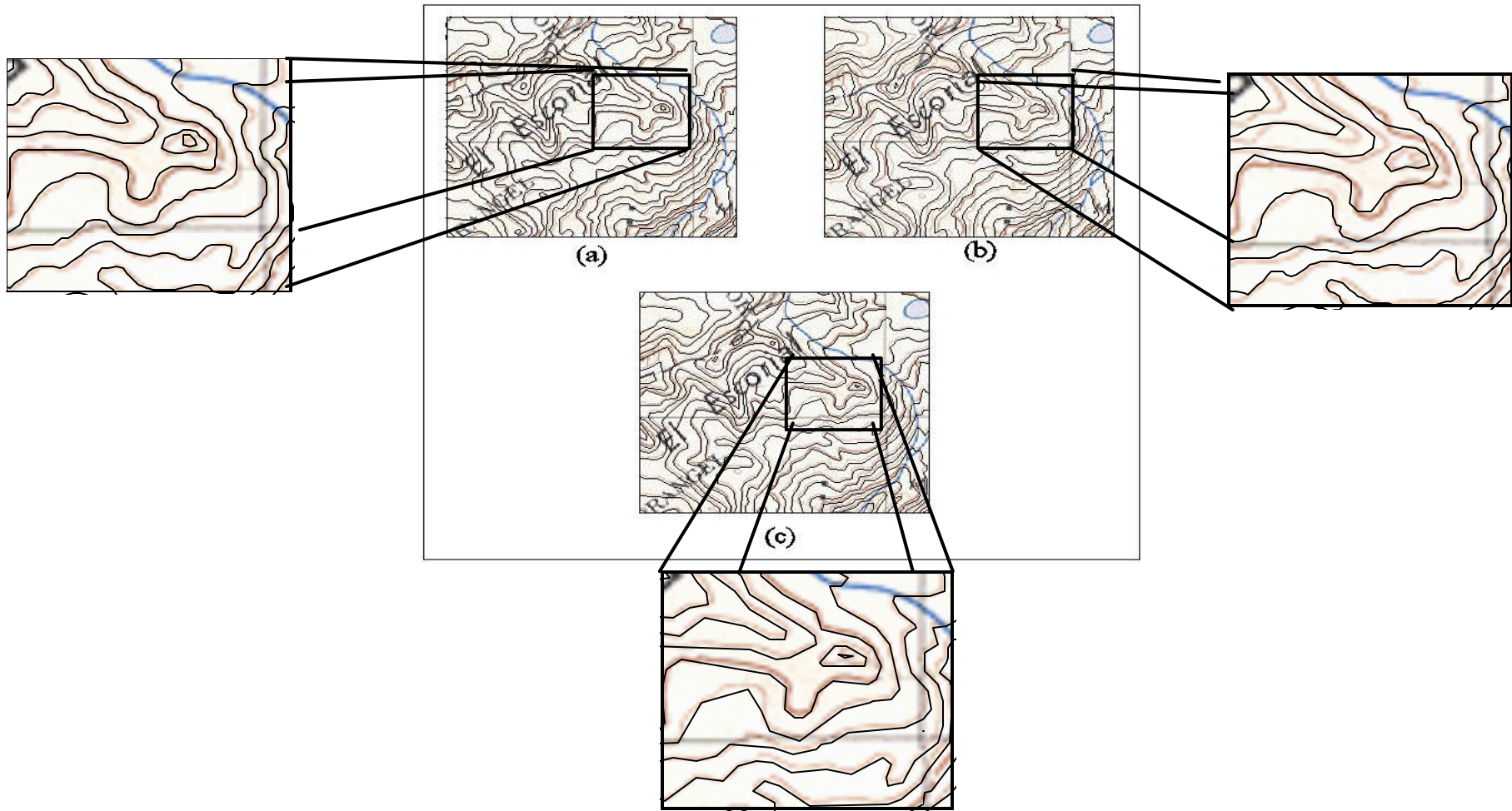


Figura 26. Curvas digitalizadas sobre mapa original: (a) Pantalla, (b) Tableta y (c) Semi – Automático.

En la Figura 27 se presenta la raíz del error medio cuadrático (REMC) obtenida con cada método, además del error de calibración (Tableta) o de georreferenciación (Pantalla y Semi – Automático) de la imagen. Se observa que con la Tableta se produjo una REMC 300 % mayor que con Pantalla y Semi – Automático, siendo la diferencia entre estas últimas los pocos relevantes (2 %)

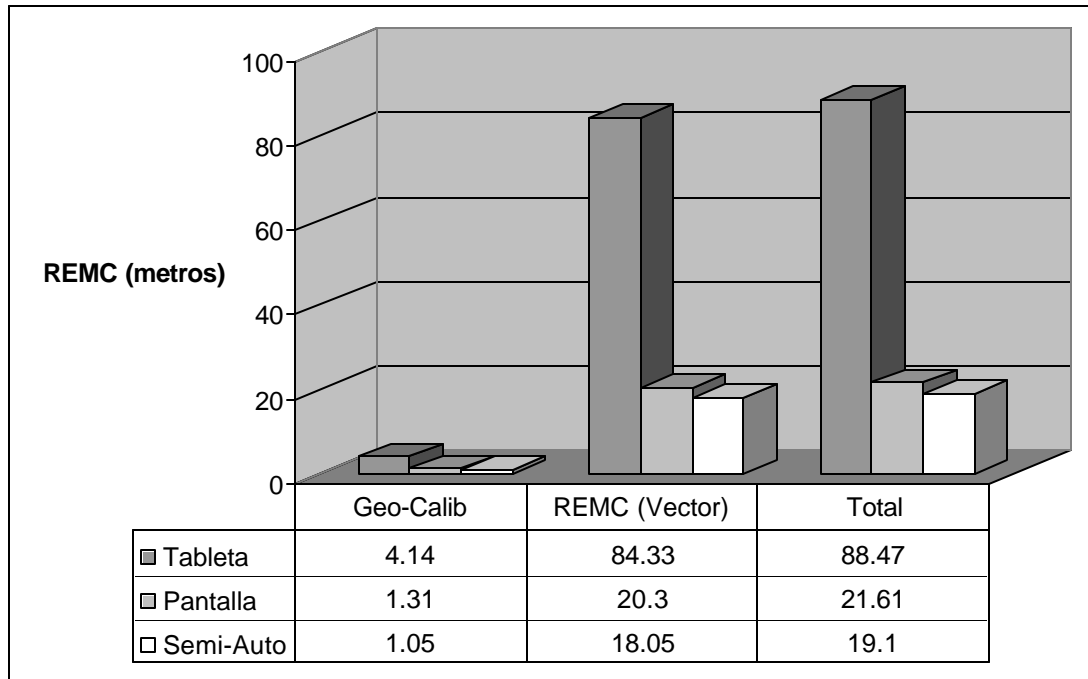


Figura 27. Raíz del Error Medio Cuadrático calculado para las curvas de nivel y los drenajes originados mediante los métodos de Pantalla, Tableta y Semi – Automático.

Por considerar de interés, además de ser complementario al punto de digitalización, se obtuvo el tiempo de digitalización parcial del mapa 1 / 100.000 correspondiente a la misma superficie digitalizada en 1 / 25.0000 (Propósito de la siguiente sección). En la Figura 28 se muestran los resultados, donde se observa como el tiempo de digitalización, de la misma superficie, es casi el 200 % mayor a escala 1 / 25.000 en comparación al obtenido anteriormente a 1 / 100.000

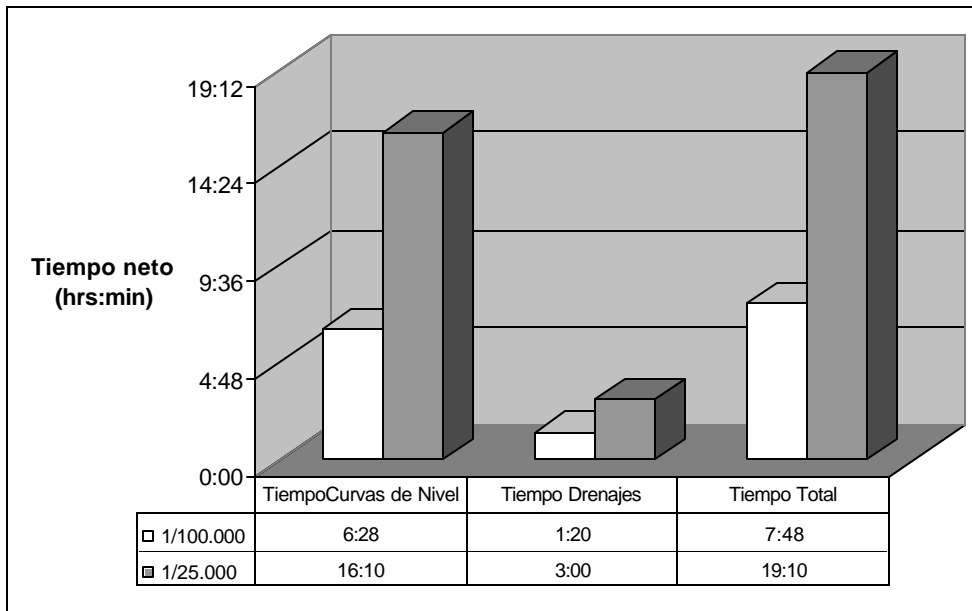


Figura 28. Tiempo neto demorado en la digitalización de las curvas de nivel y los drenajes originados a escala 1/100.000 y 1/25.000.

Gráficamente en la Figura 29 se puede observar las curvas de nivel (a) y los drenajes (b) digitalizados a 1/100.000 (azul) y 1/25.000 (rojo), allí se aprecia que a pesar de que se trata de la misma zona y la misma equidistancia entre curvas de nivel existe diferencia en posición entre sí y mayor nivel de detalle en 1/25.000 que en 1/100.000.

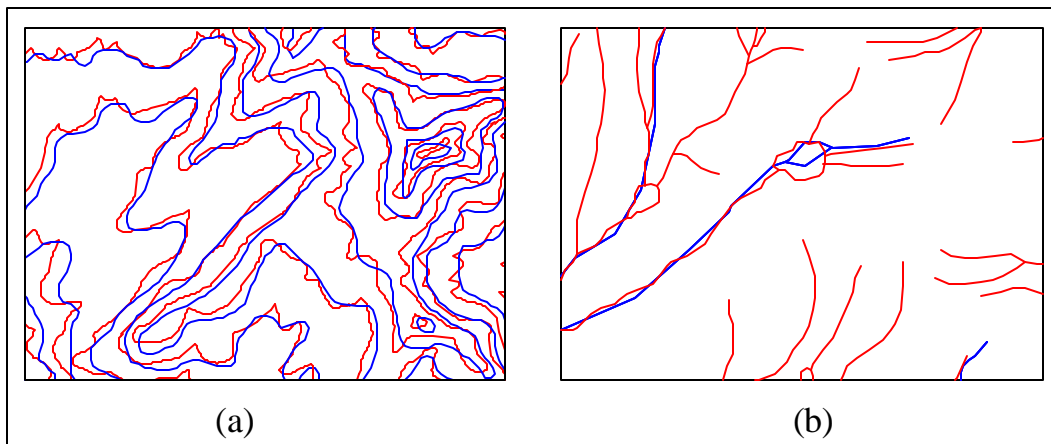


Figura 29. Curvas (a) y drenajes (b) digitalizados a escala 1/100.000 (azul) y 1/25.000 (rojo).

5.2.- Efecto de Factores de Escala en la Generación de los MDE

En la Figura 30 se muestran la REMC para los 72 MDE elaborados, observándose un rango de variación para el conjunto entre 1 y 50 m. 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.

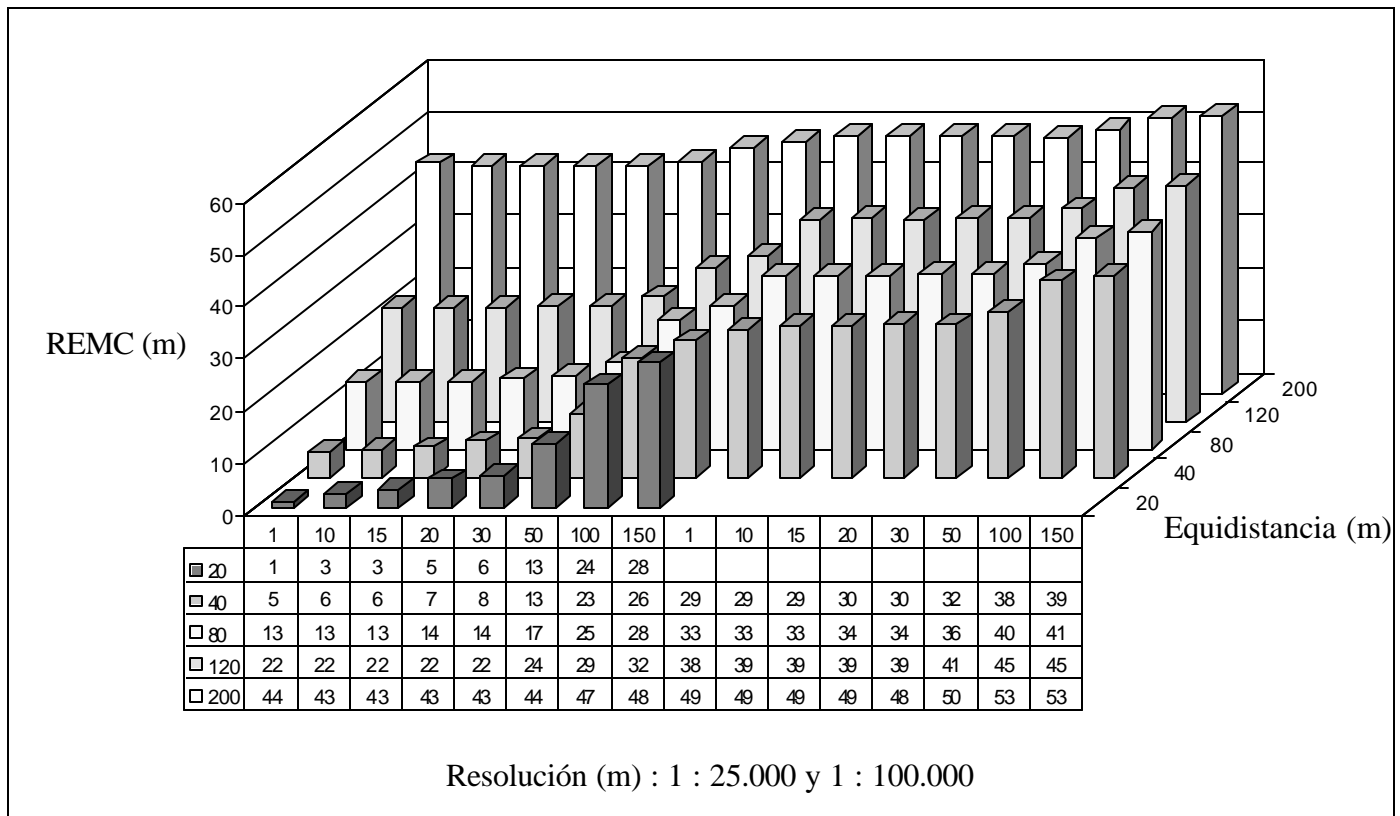


Figura 30. Resultados: Raíz de los errores medios cuadráticos de los MDE producidos.

El marcado efecto de cada factor de escala se sintetiza en la Figura 31. En primer lugar, se observa, en todos los casos que la REMC a escala 1 / 25.000 es menor que a escala 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 31 (a) y 31 (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 la REMC es prácticamente igual. Por otra parte, en las Figuras 31 (c) y 31 (d) se observa, en ambas escalas, que a mayor tamaño del píxel la 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 relevantes.

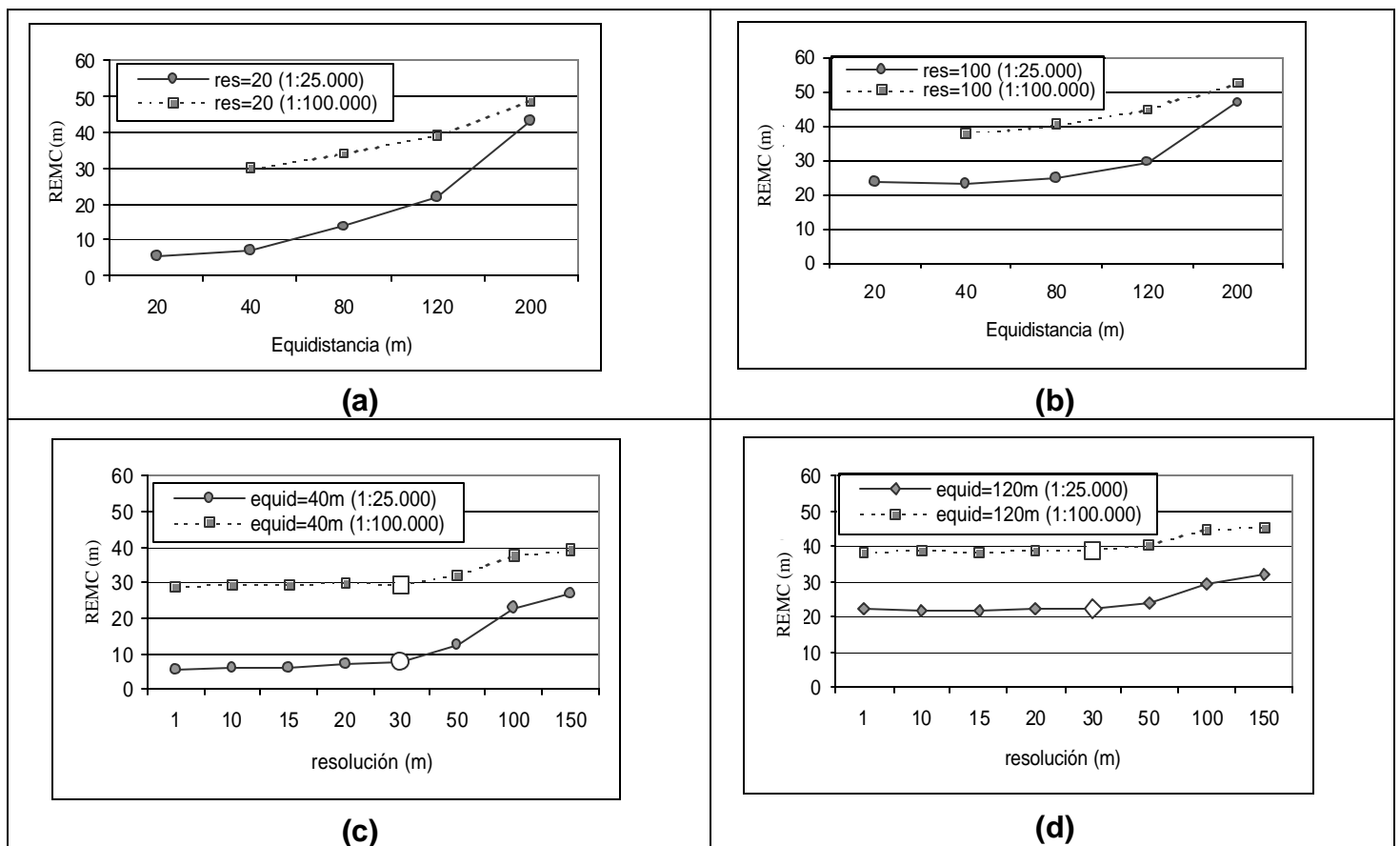


Figura 31. Análisis de resultados: (a) y (b) efecto de equidistancia y escala para dos resoluciones de píxel seleccionadas. (c) y (d) efecto del tamaño del píxel y escala del mapa para dos equidistancias seleccionadas

En las Figura 32, 33 y 34 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; aunque tampoco están bien definidos los patrones de cambio. La longitud de la red varió entre 150 y 178 km de longitud, con un coeficiente de variación (CV) de 4%.

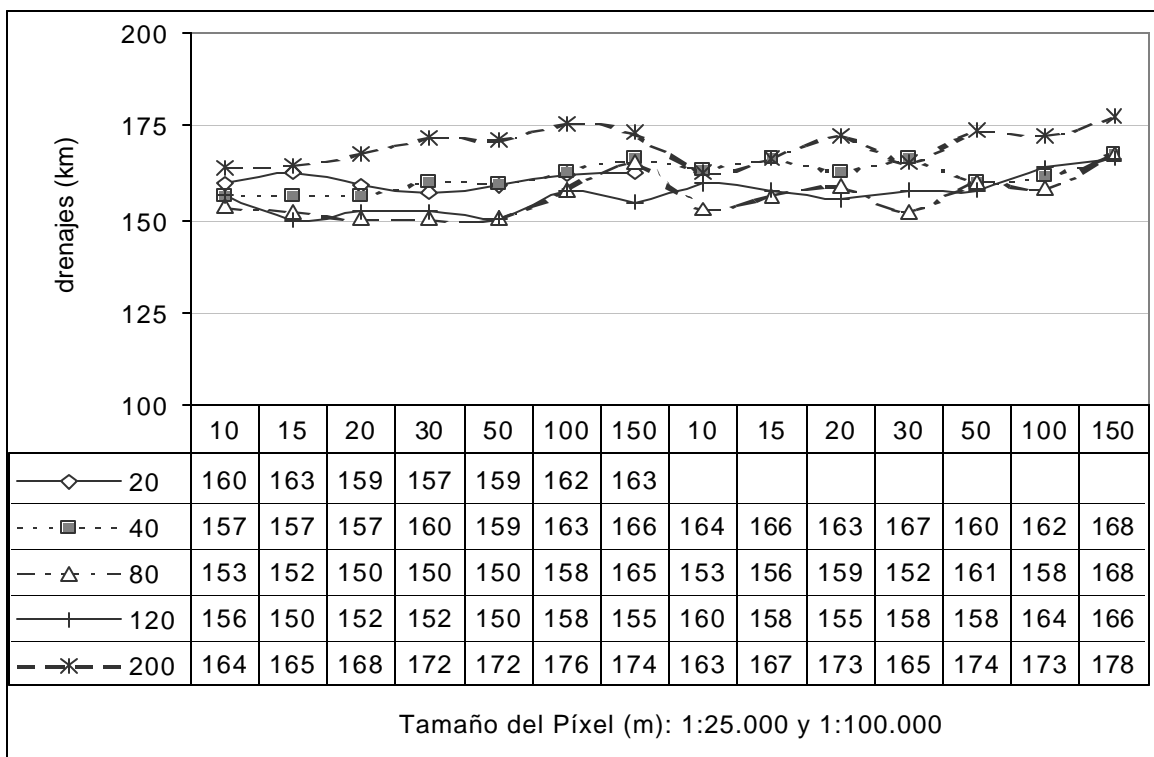


Figura 32. Longitud de drenajes, para un umbral de 250 ha

Pese a que las redes hidrográficas generadas, como se muestran en la Figura 33, lucen muy similares entre sí, un análisis detallado y exhaustivo con los drenajes digitalizadas a las diferentes escalas y las generadas mediante MDE con distintos factores de escala, (Figura 34), muestra la generación incorrecta de algunos tributarios.

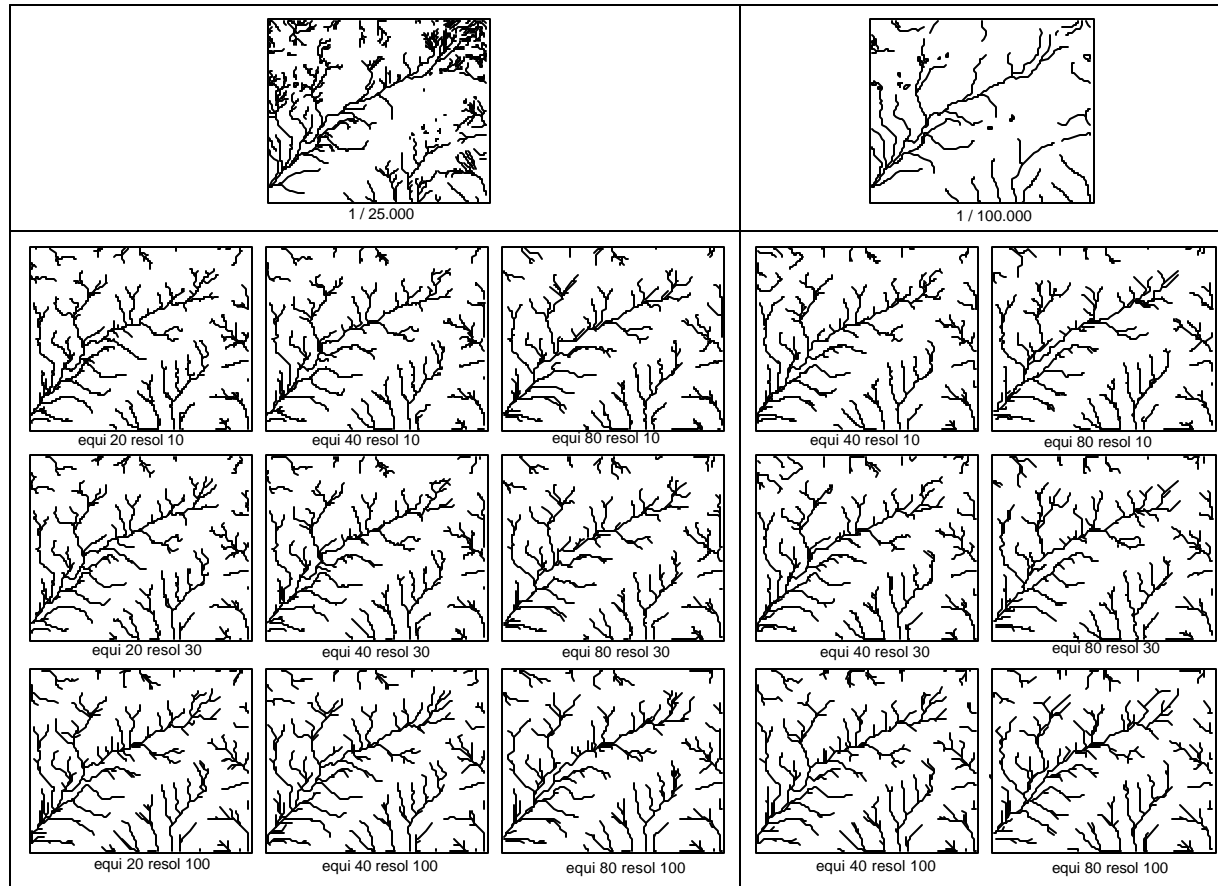


Figura 33. Drenajes digitalizados : 1 / 25.000 y 1 / 100.000; drenajes generados: de MDE con equidistancia 20, 40 y 80 m, tamaño de píxel 10, 30 y 100 m a escala 1 / 25.000 y de MDE con equidistancia 40 y 80 m, tamaño de píxel 10, 30 y 100 m y a escala 1 / 100.000

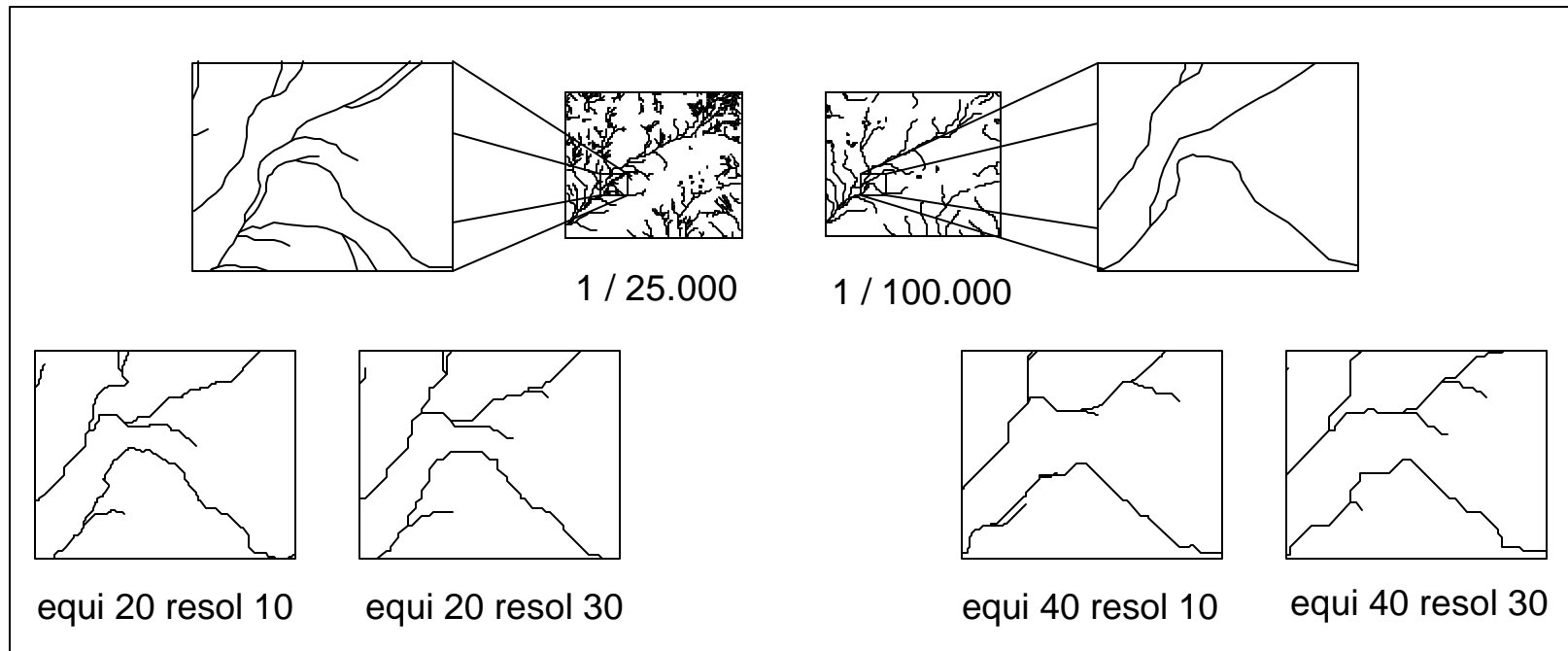


Figura 34. Drenajes digitalizados : 1 / 25.000 y 1 / 100.000; drenajes generados: de MDE con equidistancia 20 m, tamaño de píxel 10 y 30 m a escala 1 / 25.000 y de MDE con equidistancia 40 m, tamaño de píxel 10 y 30 m a escala 1/100.000

Adicionalmente se cálculo la pendiente media en porcentaje de la cuadrícula para algunos MDE con diferentes factores de escala (Figura 35). Allí se encontraron rangos de pendientes entre 32 y 39 % para escala 1 / 25.000 y entre 31 y 37 % para 1 / 100.000, con una variación de 7 y 6 % respectivamente.

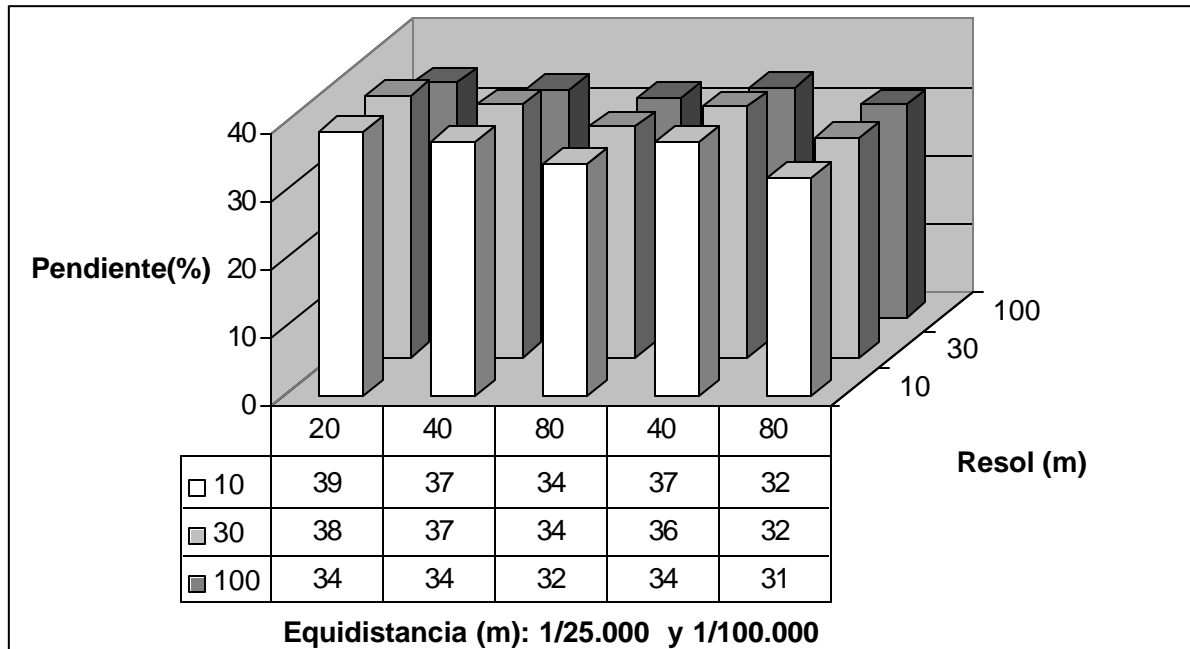


Figura 35. Pendiente media en porcentaje de MDE con equidistancia de 20, 40 y 80 m, resolución de 10, 30 y 100 m a escala 1 / 25.000 y MDE con equidistancia de 40 y 80 m, resolución de 10, 30 y 100 m a escala 1 / 100.000.

En la Figura 36 se muestra la comparación visual entre los cauces vectorizados (azul) y la red de drenaje generada (rojo) a partir de un MDE seleccionado (escala 1:25.000, equidistancia 40m y tamaño de píxel 30 m).

Una medida de la desviación o desplazamiento de la red generada en comparación con la vectorizada se presenta en la Figura 37. En la Figura 37 (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 37 (b) se observa que la desviación también crece al ser mayor la equidistancia utilizada entre curvas de nivel durante la construcción del MDE.

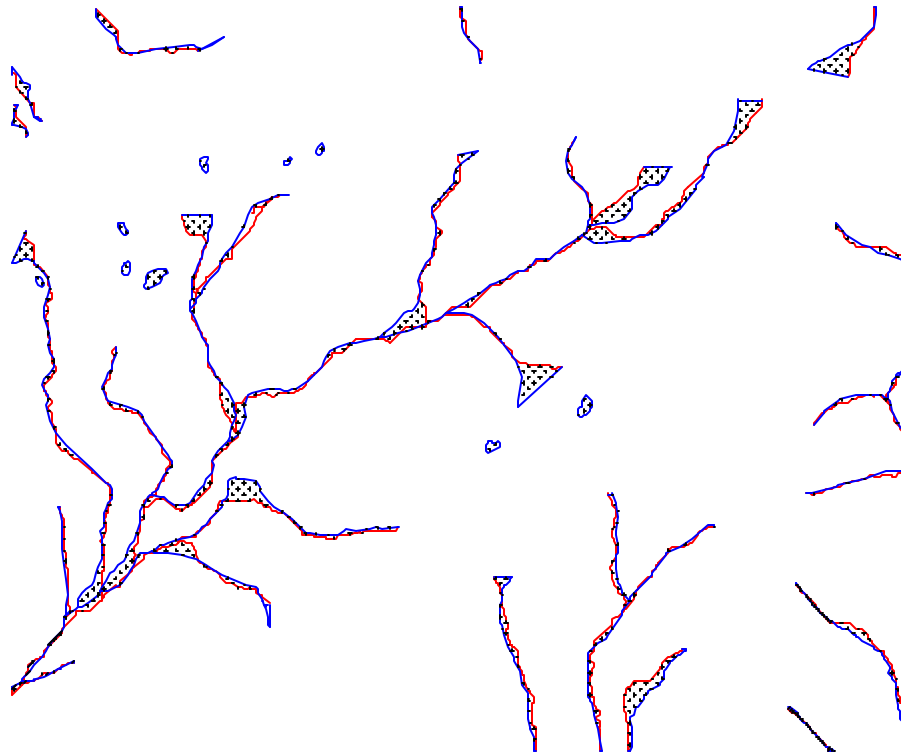


Figura 36. Comparación visual de la red hidrográfica generada (rojo) con la digitalizada del mapa original(azul) a partir de un MDE a escala 1:25.000, equidistancia 40m y tamaño de píxel 30 m.

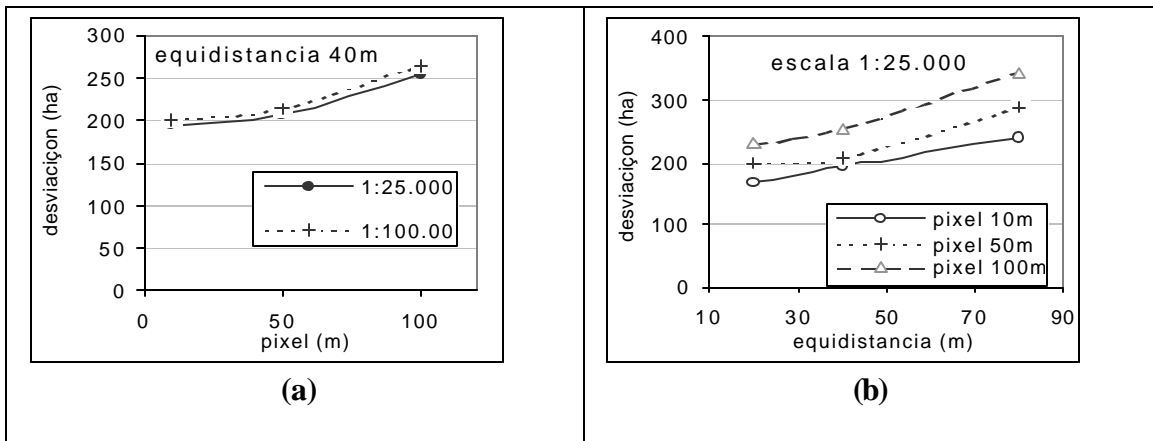


Figura 37. Efecto de escala sobre la red hidrográfica generada: (a) escala del mapa topográfico. (b) equidistancia entre curvas de nivel y tamaño del píxel

5.3.- Métodos de Interpolación en la Construcción de los MDE

Para este objetivo se utilizó las curvas de nivel digitalizadas cada 40 m obtenidas a través de las cartas cartográficas a 1 / 100.000 y píxel del modelo raster de 25 m, cubriendo un área de 784 km² superior a la de la zona en estudio.

En la Figura 38 se muestran los resultados de la evaluación estadística realizada a los MDE obtenidos mediante los diferentes métodos de interpolación y puntos acotados, allí se observa que la REMC para los MDE generados con el primer grupo de puntos acotados (51.781 puntos) fueron menores que el segundo grupo (27.478 puntos). De igual manera en ambos casos se aprecia que los métodos Spline Regularizado, Spline con Tensión, y el Kriging obtuvieron los valores más bajo de la REMC, seguido del TIN, INTERCON y IDW.

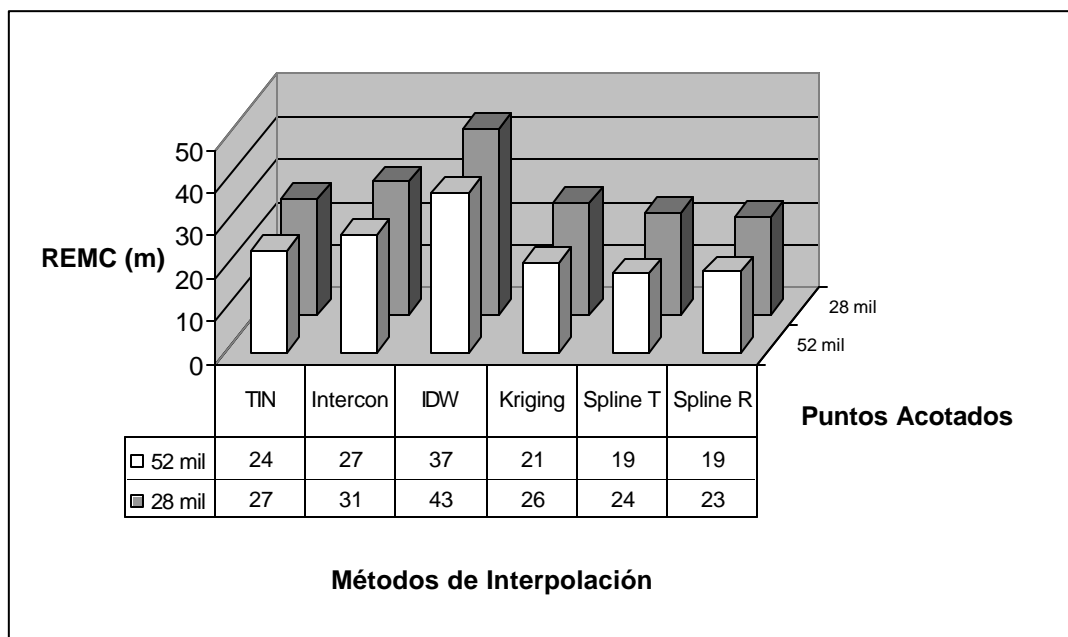


Figura 38. Resultados de la REMC para los diferentes MDE con los dos grupos de puntos acotados.

Para corroborar los resultados anteriores se originaron curvas de nivel cada 40 m de equidistancia de los MDE obtenidos mediante los primeros puntos acotados (51.781 puntos), estas curvas fueron comparadas con las digitalizadas del mapa original (Figura 39). Esto arrojó como resultado que la semejanza entre las curvas generadas y las originales se ubicaron dentro del mismo orden que los resultados de la REMC.

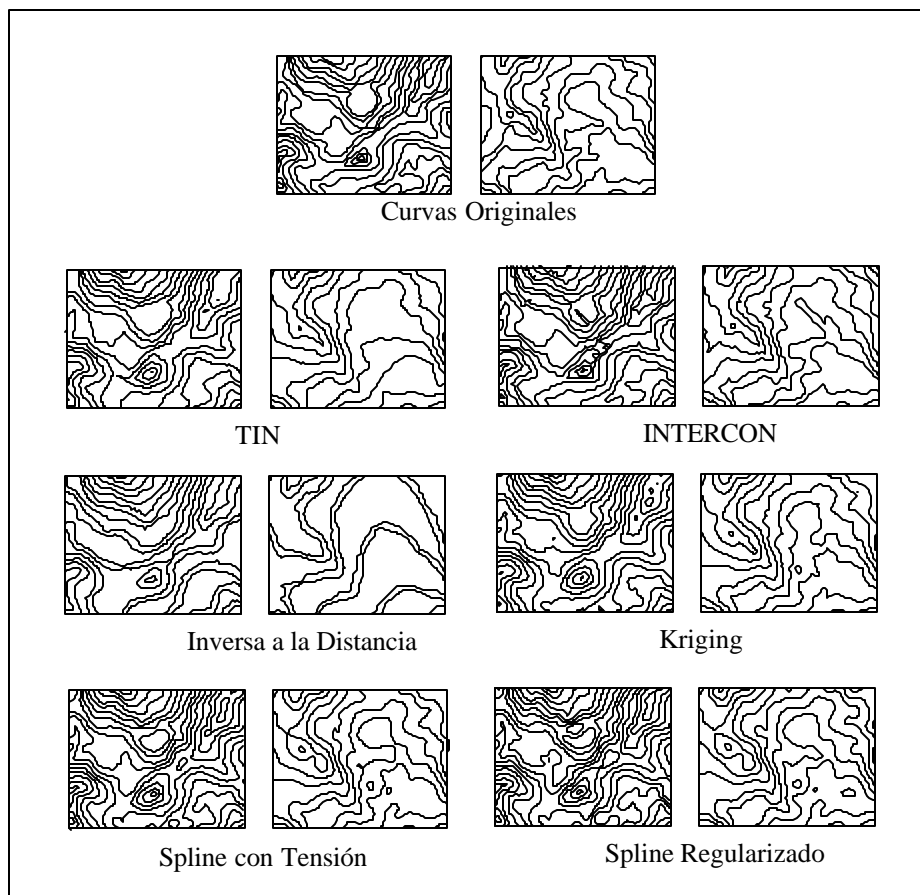


Figura 39. Comparación de curvas de nivel cada 40 metros originales y generadas a través de los diferentes MDE.

De igual forma que en el punto anterior se utilizó los MDE obtenidos a través de los primeros puntos acotados (51.781 puntos) para realizar un análisis morfométrico a toda la cuenca y en tres sectores (Cuadro 4).

Uno de los análisis realizado fue el cálculo de área, el cual arrojó como resultado valores muy semejantes entre los seis MDE y la cuenca digitalizada, tanto en sus tres sectores como en toda la cuenca, sin embargo, el MDE que se alejó del valor de la cuenca digitalizada fue el generado a través del método de interpolación IDW. De igual forma sucedió cuando se cálculo la pendiente media de la cuenca y se comparó con las pendientes de los demás MDE. Mientras que la determinación de la longitud de cauce generó valores muy parecidos en todos los MDE, teniendo una variación de 6.4 Km.

Métodos de Interpolación	Área (Km ²)				Pendiente Media (%)				Longitud de Cauce (Kilómetros)			
	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Cuenca	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Cuenca	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Cuenca
Cuenca Digitalizada	68.35	65.75	56.82	190.92	–	–	–	–	70.94	67.59	64.58	203.11
TIN	62.09	71.30	55.90	189.29	36.95	38.68	35.75	37.25	65.34	78.49	57.43	201.26
INTERCON	65.07	71.23	55.39	191.69	36.85	39.57	36.16	37.67	73.84	77.85	53.75	205.43
IDW	77.22	64.53	54.39	196.14	30.60	33.45	28.37	30.79	94.33	59.33	51.86	205.51
Kriging	65.51	65.92	57.04	188.47	36.93	39.44	35.91	37.50	67.61	74.49	57.78	199.88
SplineT	64.51	70.97	56.87	192.35	38.66	39.73	37.24	38.52	88.06	56.47	58.53	203.07
SplineR	64.28	71.33	56.48	192.10	39.94	40.78	37.86	39.64	88.33	64.14	53.73	206.28

Cuadro 4. Variables morfométricas derivada de los diferentes MDE.

Visualmente al comparar la red de drenaje generada de toda la cuenca (Figura 40) y un sector ampliado de la misma (Figura 41), con la red de drenaje digitalizada del mapa original, se ratificó los resultados numéricos obtenidos del análisis morfométrico, donde encontramos mucha similitud entre lo generado y lo digitalizado, a pesar de que los resultados del MDE originado por el método IDW se alejaron levemente de los demás. De igual manera se aprecia en la generación automática de la divisoria de cuenca y sus sectores (Figura 42).

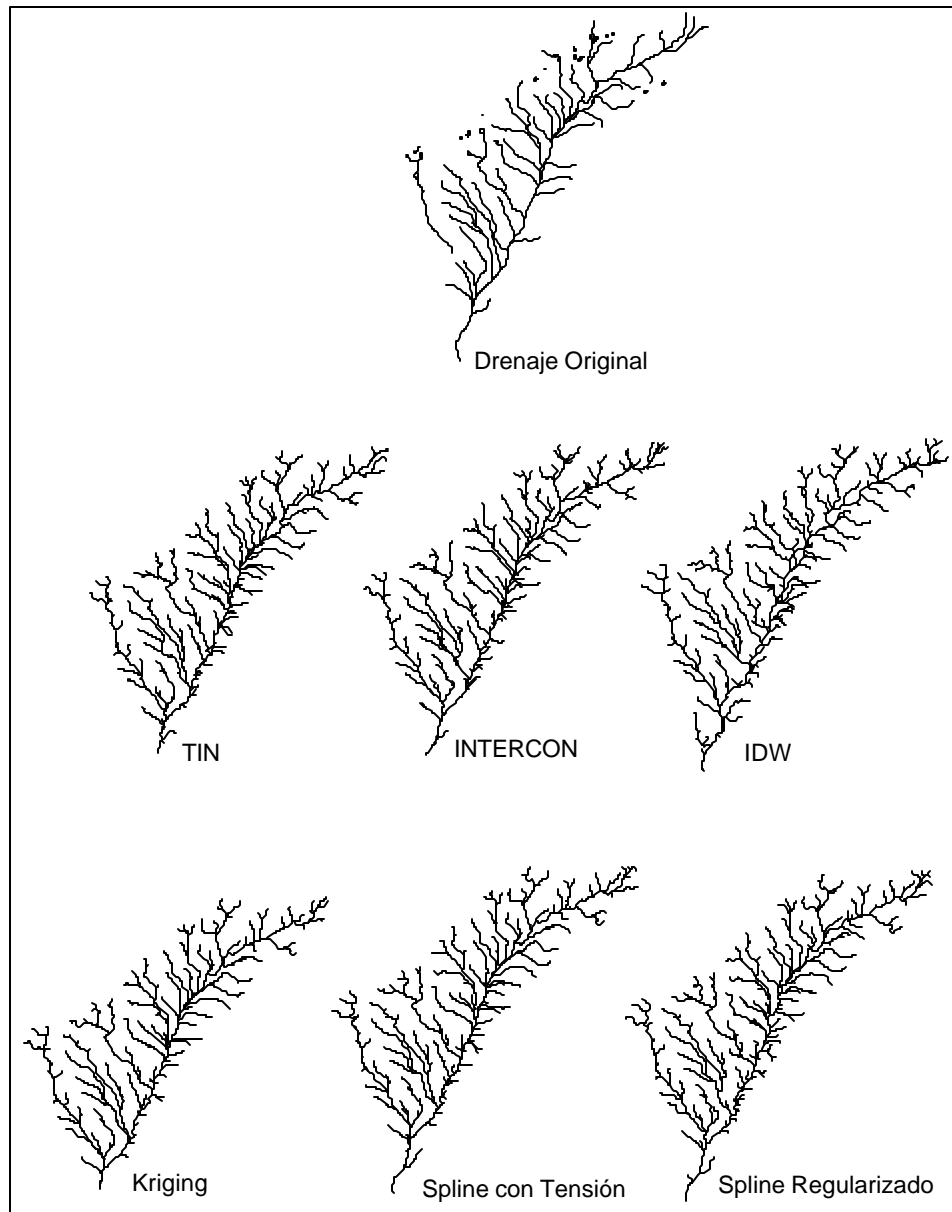


Figura 40. Red de drenaje digitalizada y generada mediante los diversos MDE.

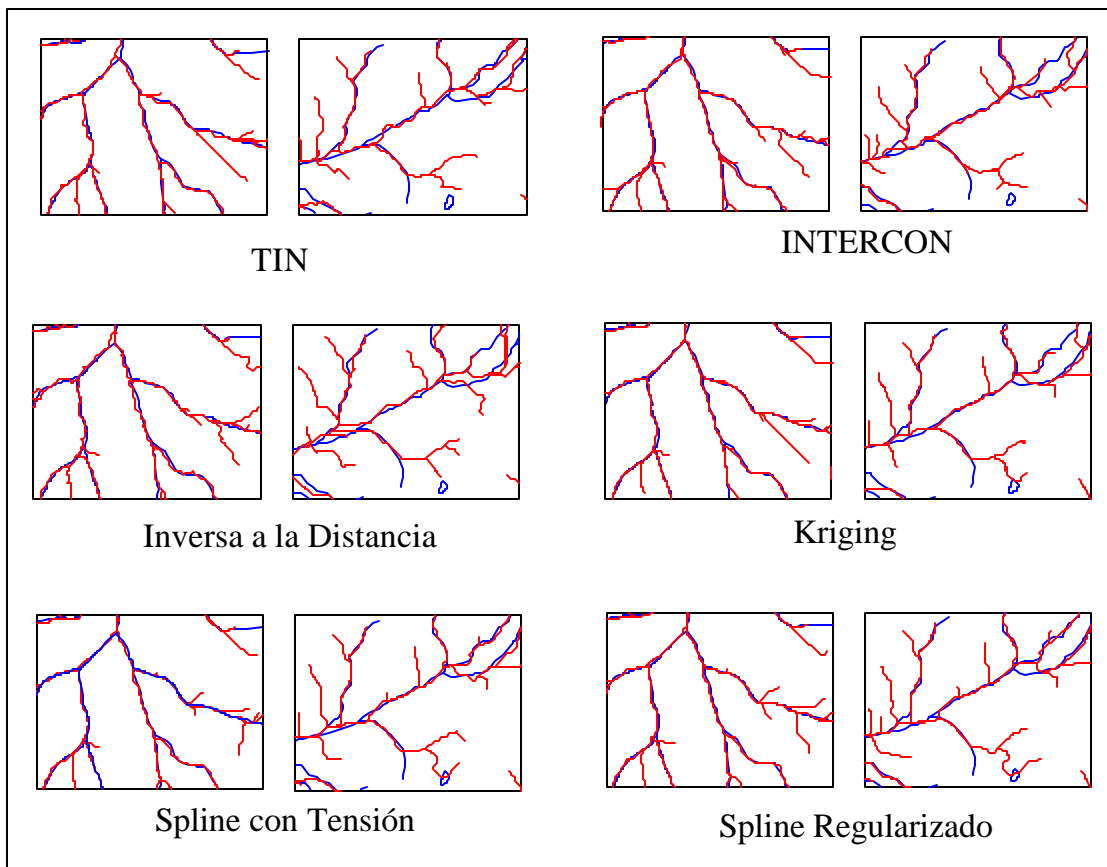


Figura 41. Comparación de los drenajes digitalizados (azul) y los generados a través de los diferente MDE (rojo).

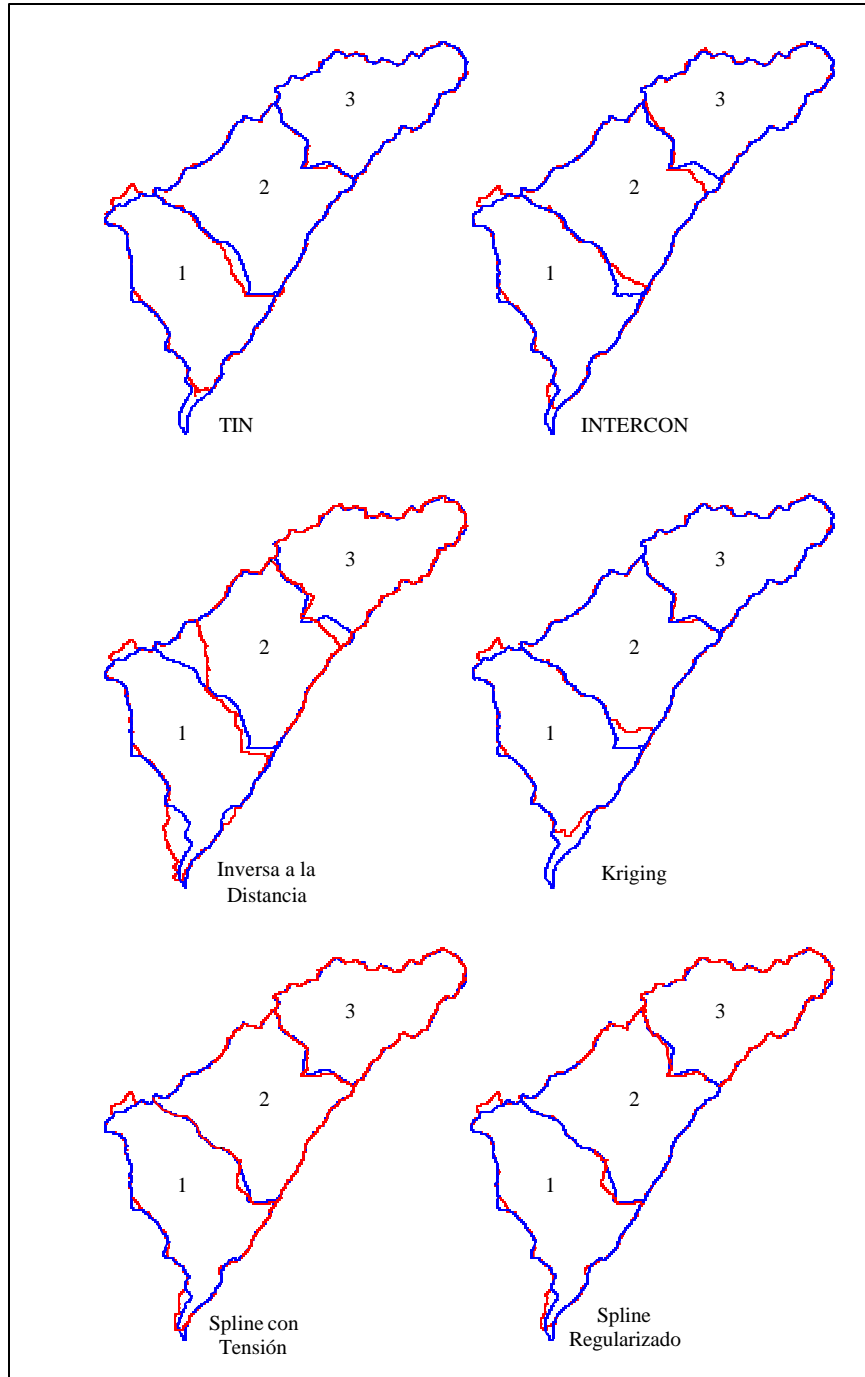


Figura 42. Comparación de las divisorias originales (azul) y las generados a través de los diferentes MDE (rojo).

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por su rapidez y reducido error medio cuadrático, el método Semi – Automático luce superior a los de Pantalla y Tableta, siempre y cuando la imagen escaneada tenga regular calidad para su procesamiento preliminar (binarización de cada capa de información).

La digitalización en Pantalla aunque consume cerca del 25 % de tiempo más que Tableta, arroja errores medios cuadráticos cuatro veces menores (similar al obtenido con el método Semi – Automático).

Con el criterio estadístico de la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC), los MDE de mayor precisión (REMC inferior a 10 m) sólo se pueden alcanzar cuando se combinan escala de mapa grande (1 / 25.000), baja equidistancia entre curvas de nivel (20 y 40 m) y mayor resolución del modelo raster (1, 10, 15, 20 y 30 m).

El efecto de la escala del mapa, se pierde a partir de un umbral de equidistancia entre curvas de nivel mayor de 120 m, presentando menor REMC a 1 / 25.000 que a 1 / 100.000. De igual manera sucede con el efecto tamaño de píxel: resoluciones de 30 m o menos producen similares REMC dentro de una misma escala de trabajo, incrementándose rápidamente para tamaños mayores.

Tanto en la generación de parámetros morfométricos (longitud de cauce y pendiente) como en la red hidrográfica (general) resultaron diferencias pocas relevantes, pudiéndose por tanto concluir que en cuenca de montaña se pueden construir MDE hasta con tamaños de píxel de 30 m, equidistancias entre curvas de nivel de 40 m y escala de mapa 1 / 100.000. No obstante, en el análisis detallado que se realizó, se determinó que no se puede garantizar la red de drenaje fiel o exacta a la original, aún con el mayor detalle posible (escala del mapa 1 / 25.000, equidistancia entre curvas de nivel 20 m y tamaño de píxel de 10 m).

Similar resultado se obtiene entre los métodos de interpolación: los parámetros morfométricos (área, pendiente media, longitud de cauce y divisoria de cuenca) presentan valores semejantes entre ellos y sin diferencia notable con los parámetros medidos de la cuenca vectorizada. Sin embargo, el método IDW, es el que presentó las mayores desviaciones, no sería recomendable de acuerdo a los resultados.

7.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGUILAR, M., AGUILAR, F., CARVAJAL, F. y AGUERA F. 2002. Evaluación de diferentes técnicas de interpolación espacial para la generación de modelos digitales del terreno agrícola [en línea] 2002. Dirección URL: http://w.w.w.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=22-51k. [Consulta: 20 Abr. 2002].

AGUILAR, T. 2001. Curso de doctorado: Generación y manejo de modelos digitales de elevación [en línea] 2001. Dirección URL: http://w.w.w.ual.es/~faguilar/curso_de_doctorado.htm. [Consulta: 20 Abr. 2002].

ALCALÁ, J. Análisis de las diferencias entre los modelos digitales de elevación [en línea] 1997. Dirección URL: <http://w.w.w.etsimo.umovi.es/~fen/invitados/alcala/texto.htm>. [Consulta: 10 Jul. 2001].

ALLAN, M. 1978. DTM application in topographic mapping . Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 44 (12): 1513 – 1520.

AUMANN, G., EBNER H. and TANG, L. 1991. Automatic derivation of skeleton lines from digitized contours. Journal of Photogrammetric and Remote Sensing. 46(02): 259 – 268.

BOLSTAD, P. and STOWE, T. 1994. An evaluation of dem accuracy: elevation, slope and aspect. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 60 (11): 1327 – 1332.

BOSQUE, S. 1992. Sistemas de información geográficas. Ediciones RIALP, S.A. Madrid – España.

BUJA, K. 2003. “Gridstak” (Extensión para ArcView) [en línea] 2003. Dirección URL: <http://www.arcsript.home.com>. [Consulta: 22 Jul.2003].

CARTER, J. 1988. Digital representations of topographic surfaces. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 54 (11): 1577 – 1580.

CARVACHO, L. y SÁNCHEZ, M. Modelos digitales del terreno: comparación entre modelo TIN y el INTERCON. [en línea] 1997. Dirección URL: <http://w.w.w.etsimo.umovi.es/~fen/invitados/carvacho/texto.htm>. [Consulta: 10 Jul. 2001].

CLAUS, M. 1984. Digital terrain models through digital stereo correlation. Photogrammetria. 39 (4-6): 183 – 192.

CLARK, 2001. Geographic análisis and imagen processing software. [en línea] 2001. Dirección URL: <http://www.clarklabs.org/ldrisoftware.asp?cat=2>. [Consulta: 22 Jul.2003].

DAY, T. and MULLER, J. 1989. Digital elevation model production by stereo image pairs: a comparison of algorithms. *Imagen Vision Comput.* 7 (2): 95 –101.

DECELIS, J. 2001. Digitalización automatizada de líneas en mapas raster [en línea]. 2001. Dirección URL: <http://www.cic.inp.mx/ute/indiceute/tesisistas/Tesisistas/TesisMC/JOAQUINDECELIS/JOAQUINDECELISM2.htm>. [Consulta: 12 Mar. 2003].

DIELMO.2002. Modelos digitales del terreno de calidad en WWW. DIEILMO. 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].

FERNÁNDEZ, X., LOPEZ, O. Y RIVEIRO, F. 2000. Separación de colores orientado a la vectorización de planos topográficos. [en línea] 2000. Dirección URL: <http://www.gpi.tsc.uvigo.es/pub/reports/cap4>. [Consulta: 06 Jul.2002].

GRUPO DE PROCESADO DE IMAGEN. 2002. Entorno de vectorización automático [en línea] 2000. Dirección URL: <http://www.gpi.tsc.uvigo.es/pub/papers/jipi.pdf>. [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].

GOLD, Ch. 1991. Problems with handling spatial data – the voronoi approach.. *CISM Journal ACSGC.*45 (1) : 65 - 80.

GUTIÉRREZ, J. 1999. Utilización de técnicas de procesamiento digital de imágenes y sistemas de información geográfica en la determinación de cambios en la cobertura vegetal y uso de la tierra, Cuenca del Río Mucujún, Estado Mérida. Trabajo especial de grado para optar al título de Magíster Scientiae en Manejo de Cuencas Hidrográficas, Centro de Estudio Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes, Mérida. Venezuela

HERBOLD, C. 2003. "Compiled theme tools" (Extensión para ArcView). [en línea] 2003. Dirección URL: <http://www.arcsript.home.com>. [Consulta: 22 Jul.2003].

KAUFMANN, D. and HAJA, S. 1988. Extraction of dense digital elevation models from SPOT stereo imagery. Proceedings of the 1988 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vol 1 : 477 – 478.

LEVACHKINE, S. 2000. Digitalización automatizada de mapas raster [en línea]. 2002. Dirección URL: <http://www.revista.unam.mx/vol.0/art3/patrones.html>. [Consulta: 12 Mar. 2003].

LONGLEY, P., GOODCHILD, M., MAGUIRE, D. and RHIND, D. 1999. Geographical information systems. John Wiley and Sons, INC. Vol 1. USA.

GEO VECTRA S.A, 2002. Modelamiento de superficie [en línea]. 2001. Dirección URL: <http://www.geovectra.el>. [Consulta: 12 Mar. 2003].

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/default.html>. [Consulta: 15 Mar. 2003].

MITASOVA, H. 1999. Multidimensional spatial interpolation [en línea]. 1999. Dirección URL: <http://www2.gis.uiuc.edu:2280/modviz/viz/sinter.html>. [Consulta: 13 Jun. 2000].

NERO, M. y CINTRA, J. 2001. Digitalización de mapas: estudio comparativo de metodologías [en línea]. 2001. Dirección URL: <http://www.asovig.nstemp>. [Consulta: 05 Jun. 2002].

OLIVERA, F. 1999. CRWR-PrePro : An Arc View preprocessor for hydrologic, hydraulic and environmental modelling. [en línea] 1999. Dirección URL: <http://www.ce.utexas.edu/prof/olivera/prepo/prepo.html>. [Consulta: 22 Jul.2003].

PHILIP, G. and STEVEN, F. 1996. Comparison of derivative topographic surfaces of a dem generated from stereoscopic SPOT images with field measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 62 (10): 1165 – 1171.

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].

RUIZ, M. Et al. 1996. Generación de un modelo digital de elevación utilizando un sistema de posicionamientos global (GPS). En: *Actas del VIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, v. II, pp. 83-89. Jeán.

SÁRKOZY, F. Gis funtions – interpolation [en línea]. 03 Abril. 1998. Dirección URL: http://w.w.w.agt.bme.hu/public_e/funcint/funcit.html. [Consulta: 02 Jul. 2001].

SUN, G., RANSON, J., BUFTON, J. and ROTH, M. 2000. Requirement of ground tie points for InSAR dem generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 66(1): 81 – 85.

TAPES, 2000. Tapes: terrain analysis programs for the environmetal sciences [en línea]. 2000. Dirección URL: <http://cres.anu.edu.au/software/tapes.html>. [Consulta: 09 Mar. 2001].

TERRAINMAP.COM. 2002. Digital Terrain modeling and mapping journal [en línea]. 2002. Dirección URL: <http://www.terrainmap.com>. [Consulta: 12 Ene. 2002].

VILCHEZ, J. 2002. Evaluación de la exactitud de modelos de elevación digital (MDE) de malla regular generados a partir de curvas de nivel. *Revista Geográfica Venezolana*. 41(2): 239 – 256.

WECHSLER, S. 1999. Digital elevation model (DEM) uncertainty: evaluation and effect on topographic parameters [en línea]. 2000. Dirección URL: <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap262/p262.htm>. [Consulta: 05 Jul. 2001].

WEIDNER, V. and FORSTHER, W. 1995. Towards automatic building extraction from hig – resolution digital models. *Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. 50(04): 38 – 49.02

WISE, S. 2001. Error assemente for digital terrain models [en línea] 2001. Dirección URL: http://w.w.w.shet.ac.uk/geography/staff/wise_stephen/dtm/dtm.htm. [Consulta: 09 Jul. 2001].

APÉNDICES

APÉNDICE A

**EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE
DIGITALIZACIÓN**

APÉNDICE A.1

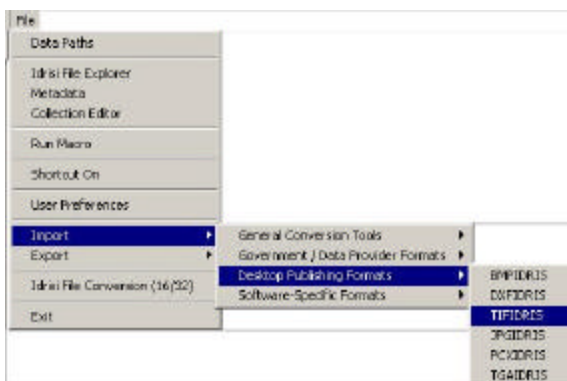
MÉTODO DE DIGITALIZACIÓN POR PANTALLA Georreferenciación, definición de tolerancias y creación de entidades gráficas (Cartalinx)

GEORREFERENCIACIÓN

Después de obtener la imagen raster del mapa original bajo el formato Tiff, se importó a IDRISI 32 donde se georreferenció.

Procedimiento

1. La imagen se importó mediante el comando File / Import / Desktop Publishing Formats / TIFIDRIS



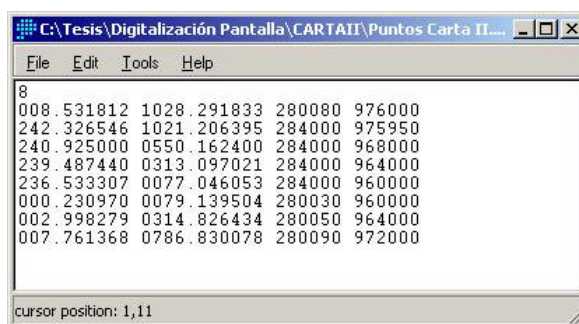
Aquí se le colocó el nombre de la imagen de entrada (Carta II) y el mismo a la imagen de salida, de igual manera en el botón de referencia de la información de la imagen se le asignó el número de filas 1029 y de columnas 419 para indicar el mismo tamaño de la imagen de entrada a la imagen de salida, dejando en blanco el resto de los campos ya que la imagen no está georreferenciada y no tenemos valores del terreno para colocarlos, tal como el valor mínimo y máximo de coordenadas

2. Desplegamos la imagen y a través del botón de característica de propiedades



donde aparece una ventana con un campo de atributos y otro de valores, ubicamos 8 puntos de control de la imagen (cruce de los ejes de coordenadas) que nos permitió georreferenciarla junto con sus homólogos de las coordenadas reales (UTM) de la carta en papel.

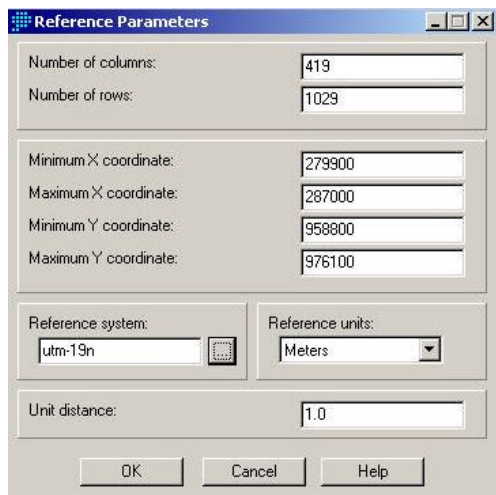
3. Con estos datos de coordenadas de la imagen y reales del terreno (UTM) se originó un archivo de correspondencia con extensión .cor, mediante el comando Data Entry / Edit.



Archivo de correspondencia utilizado para georreferenciar la imagen.

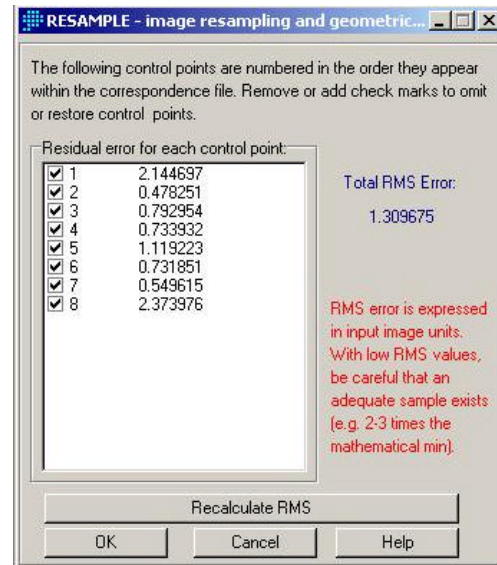
4. Una vez que se obtuvo este archivo se procedió a realizar el remuestreo a través de

técnicas de regresión estadísticas las cuales permiten asignar a píxel de la imagen las coordenadas reales del terreno. Se empleó el método lineal como método de interpolación de coordenadas, utilizando el esquema del vecino más cercano. Se mantiene el número de filas y columnas de los archivos importados y se difieren los valores máximos y mínimos de las coordenadas reales correspondiente a los extremos de la cobertura. Se seleccionó como sistema universal de referencia el UTM en su uso horario 19n



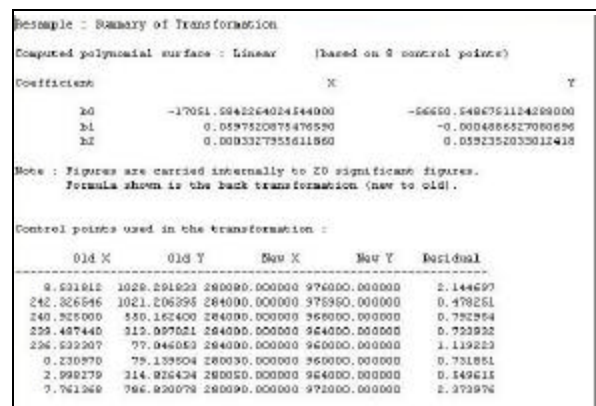
Parámetros de referencias utilizados para georreferenciar la imagen.

5. Después de introducirle al sistema todos estos parámetros aceptamos y apareció un cuadro de dialogo donde se mostró los valores de la REMC de posición en cada punto y en el mismo orden en que fueron introducidas, de igual manera un valor total .



Valores de la REMC para cada punto y el total

6. Se aceptaron estos valores para que continuara con el remuestreo, al finalizar se observó la imagen geoméricamente corregida y con información de georreferencia, así como también información acerca del proceso realizado (análisis de los residuales).



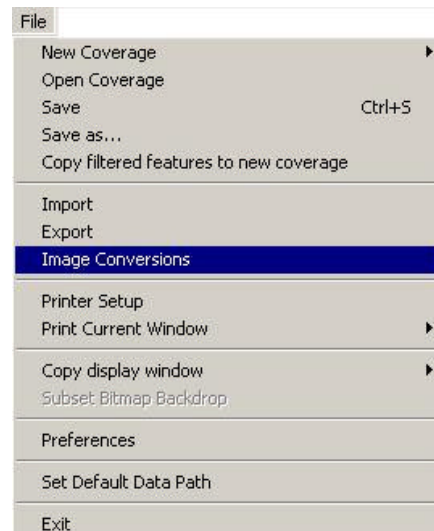
Análisis de residuales.


DEFINICIÓN DE TOLERANCIAS Y CREACIÓN DE ENTIDADES GRÁFICAS

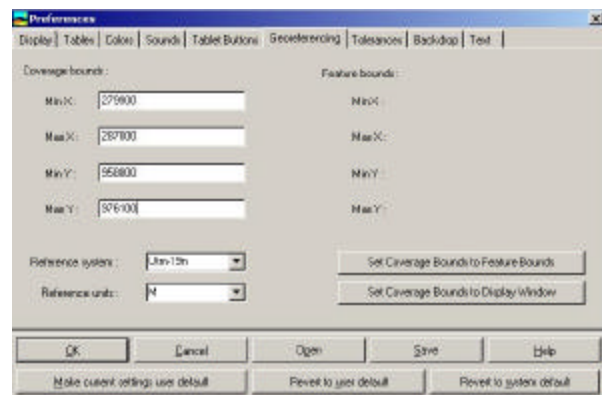
7. El sistema de creación de entidades gráficas es compatible a IDRISI, pero requiere utilizar archivos georreferenciados con formato IDRISI 16. Puesto que utilizamos archivos IDRISI 32, se requirió realizarle una conversión del formato al archivo, a través del comando File / Idris File Conversión (16/32).



8. Posteriormente se abrió Cartalinx y se realizó la conversión de la imagen de IDRISI 16 a Cartalinx, mediante el comando File / Imagen conversions. Allí se le asignó la paleta de colores que tiene el mismo nombre de la imagen original y se le colocó el nombre al nuevo archivo.



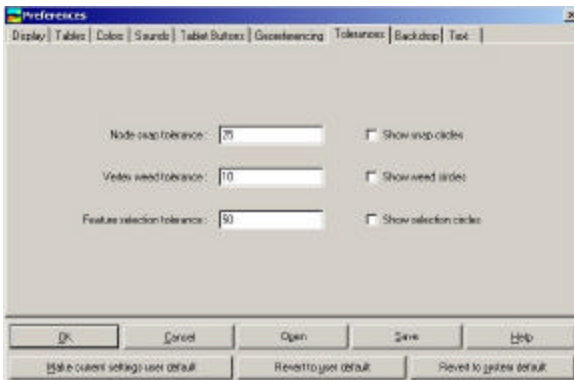
9. Se abrió las preferencias usando el icono , y se activo la pestaña de georreferencia para crear el área de trabajo mediante la asignación de los parámetros de la carta georreferenciada (coordenadas X, Y mín y máx, el sistema de referencia y las unidades), que posteriormente se guardó como una archivo con el nombre Georrf.





Coordenadas utilizadas para establecer el área de trabajo.

10. Luego se desplegó el archivo del área de trabajo (Georrf) y se activo las preferencias para

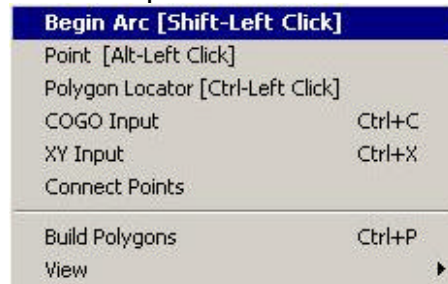
seleccionar la pestaña de Backdrop e indicar la imagen de fondo que fue la que se importó en el paso 9, y luego establecer las tolerancias de nodos colgantes 25m, vértice de líneas 10 m y selección de atributos 50 m, mediante la pestaña de tolerancias.



Tolerancias utilizadas durante el proceso de digitalización por pantalla.

11. Una vez desplegada la imagen en Cartalinx se activo la opción de chorros de puntos  para realizar el seguimiento de las curvas y drenajes, de una manera continua manteniendo el botón derecho presionado y no de una manera repetitiva en la cual se va realizando una serie de clic para originar los vectores.
12. Posteriormente se ubicó la zona de inicio seleccionada para empezar a digitalizar la carta mediante comando "Zoom"  que permitió obtener el tamaño más ideal para el proceso.
13. Se seleccionó el inicio de la curva o drenaje y se activo el botón derecho para que se desplegará un cuadro de

dialogo y seleccionar la opción de empezar el arco.



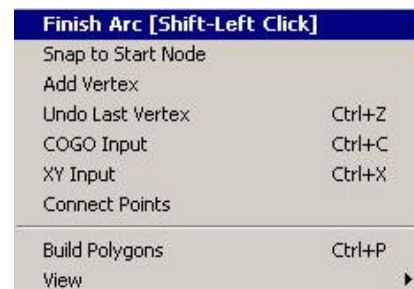
Inicio de construcción de arco

Con esta opción se empezó a construir el vector mediante el seguimiento de la línea (curva o drenaje), con el botón derecho del ratón presionado.



Seguimiento de la línea en la construcción del vector.

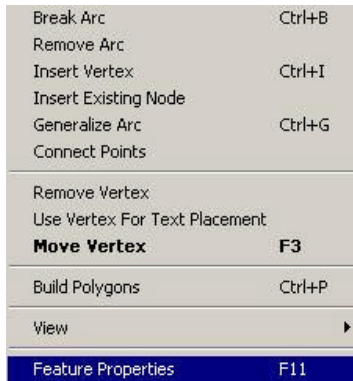
Al finalizar dicho seguimiento presionamos el botón derecho y terminamos el arco.



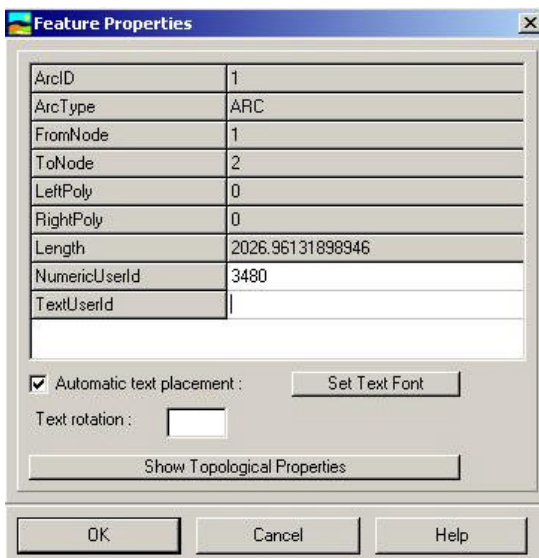
Finalización de la construcción del arco.

Después de finalizar el arco se seleccionó con el ratón y presionando

el botón derecho se activo su base de datos mediante el comando características de propiedades y se introdujo en el campo numérico el valor correspondiente a la cota de la curva digitalizada.



Selección de las características de las propiedades del arco generado.



Introducción de el valor numérico de la cota a cada curva digitalizada


14.El proceso fue similar cuando se generó todas las líneas correspondiente a las curvas de nivel, mientras que con los drenajes se realizó el mismo procedimiento pero sin el llenado de las bases de datos.

APÉNDICE A.2

MÉTODO DE DIGITALIZACIÓN SEMI – AUTOMÁTICO Procesamiento de la imagen y generación de las entidades gráficas. (CAD Overlay 2000i)

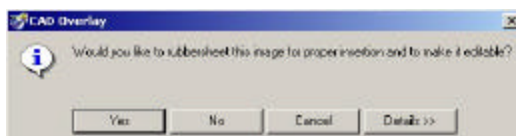
Procedimiento

1. Inicialmente se insertó la imagen GeoTiff georreferencia

con el botón  de inserción ubicado en la barra de herramienta de Cad Overlay.

2. Inmediatamente el sistema reconoció la imagen georreferenciada y pidió el punto de inserción de la misma dentro del área de trabajo, así como también si se iba a insertar con la misma escala o con algún ángulo de rotación, para este caso se dejó todo por defecto en sus tres cuadros de diálogos posteriores.

3. Por último apareció un cuadro de diálogo preguntando si la inserción era apropiada, es decir, si se conserva las coordenadas de la imagen o si se desea editarla a través del comando **rubbersheet** para georreferenciarla en el mismo sistema. En este procedimiento se dijo que **NO** puesto que la imagen ya estaba georreferenciada.



4. Al insertar la imagen se procedió a procesarla, de la siguiente manera:

- 4.1.- Se utilizó el comando cambio



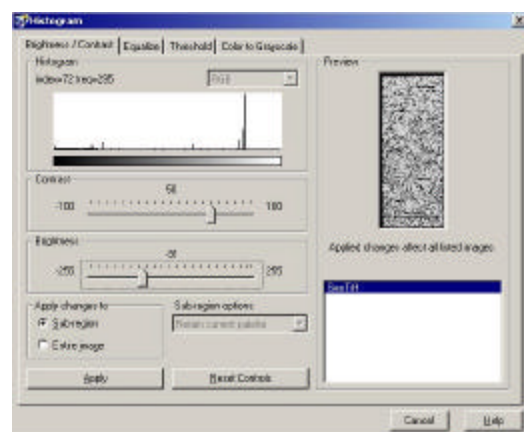
de color  para llevar la imagen del color verdadero a escala de grises.



Imagen Original y a escala de grises


- 4.2.- Después de tener la imagen a escala de grises se manipuló

mediante el histograma , dándole un valor de contraste de 50 y uno brillante de -91.



Valores de contraste y brillantes utilizados para procesar la imagen.

4.3.- Luego se transformó a binaria mediante el modulo

cambio de color 

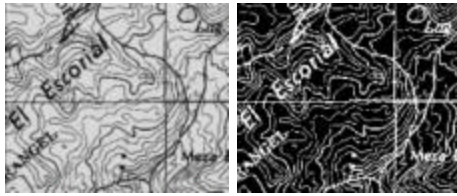


Imagen después de manipular el histograma y de transformar a binaria.

4.4.- Una vez binarizada la imagen se invirtió de color con



el modulo invertir 



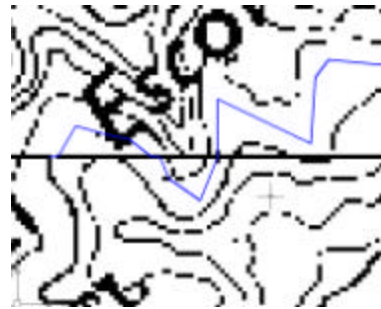
Imagen invertida

5. Después de procesada la imagen se utilizo el comando

seguidor de contorno  para realizar el proceso interactivo de digitalización, el cual consistió en el remonte de la línea sobre los píxeles de igual color, sustituyendo la misma a los píxeles remontados.

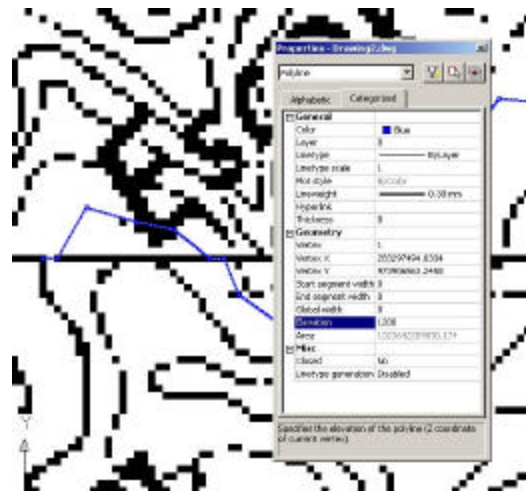


Remonte de la línea



Sustitución de la línea por los píxeles remontados.

6. Después de haber realizado la sustitución de la línea por los píxeles se le asignó la respectiva cota a la línea mediante el llenado de su base de datos, esto consistió en darle doble clic a la línea generada para que apareciera su tabla de datos y colocarle el valor de la cota sobre la fila denominada "elevation"



7. De esta manera se digitalizó el resto de las curvas de forma interactiva y los drenajes, pero sin el llenado de la base de datos, en el último caso.



APÉNDICE A.3

METODOLOGÍA PARA EVALUAR ESTADÍSTICAMENTE LOS MÉTODOS DE DIGITALIZACIÓN

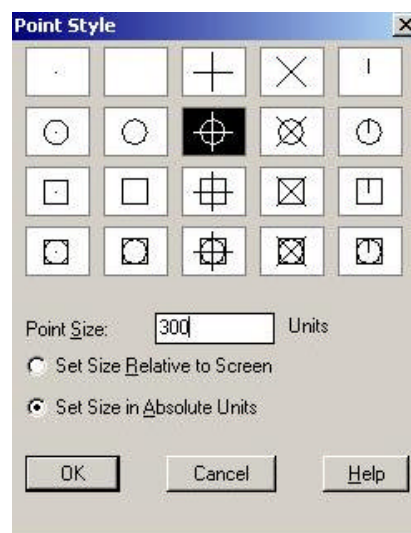
OBTENCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL EN EL MAPA

Este procedimiento al igual que el resto de los procedimientos utilizados para obtener los puntos de control y evaluar estadísticamente los métodos de digitalización se realizó a través de los software Auto Cad Map, Cad Overlay y EZXsurf.


Procedimiento

1. Como el mapa georreferenciado se encontraba en IDIRISI 32 se exportó bajo el formato Tiff para que mantuviera sus coordenadas, esto se realizó mediante el comando File / Export / Desktop Publishing Formats / TIFIDRIS.
2. Después se insertó la imagen Tiff georreferenciada con el botón  de inserción ubicado en la barra de herramienta de Cad Overlay.
3. Allí se originó una capa denominada puntos de control, a través del icono crear capas  se le asignó el nombre y se le colocó el color rojo para distinguir dichos puntos.
4. Posteriormente se diseñó el estilo de los puntos mediante

el comando Format / Point Style, donde se seleccionó el estilo del punto, tamaño (300 m) y unidades absolutas del punto con respecto al área de trabajo.



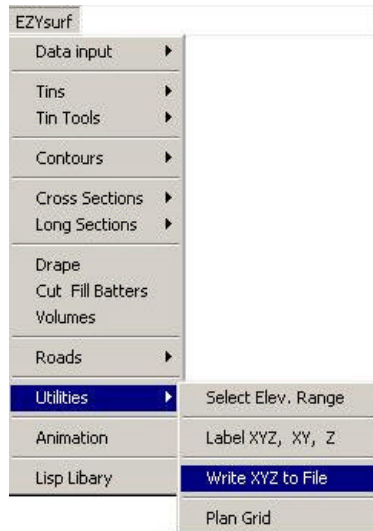
Estilo de punto utilizado para extraer los puntos de control

5. Una vez diseñado los puntos y mediante el botón Zoom de Ventana  se seleccionó los puntos de control en la imagen, teniendo en cuenta el criterio planteado de 6 puntos por cuadro originado del sistema de coordenadas.



Puntos de control obtenidos a través de la imagen

- Posteriormente con el EZXsurf se escribieron las coordenadas de los puntos de control generados (51 puntos) en un archivo de texto ASCII, a través del comando EZYsurf / Utilities / Write XYZ to file.

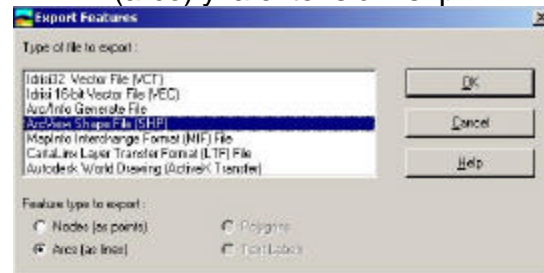


- Una vez que se originó dicho archivo se importo a la hoja de calculo EXCEL, mediante el asistente para importar texto, este nos presentó tres cuadro de diálogos en el cual preguntó, bajo que formato se quería exportar dichos datos, delimitación, tabulación y espaciado de los datos.

- De esta manera se transformó el archivo .asc a un archivo .xls, para que junto con sus homólogos de los archivos vectoriales calcular la Raíz del Error Medio cuadrático.

OBTENCIÓN DE COORDENADAS EN LOS PUNTOS HOMÓLOGOS DE LOS ARCHIVOS VECTORIALES

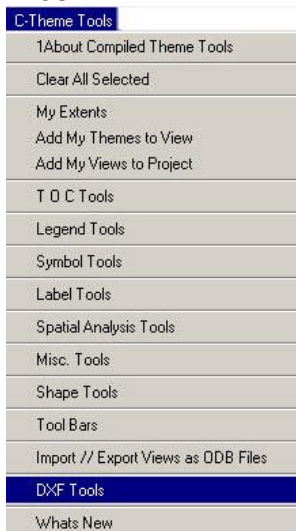
- Los archivos vectoriales generados mediante el método de pantalla y tableta (extensión .lnx de Cartalinx) se exportaron a Auto Cad (extensión .dxf.). Como Cartalinx no tiene un módulo que realice esta exportación directamente, se tuvo que realizar en dos pasos; primero: se exportaron los archivos .lnx a .shp de Arc View mediante el módulo File / Expot, allí se seleccionó el tipo de archivo (arco) y la extensión .shp.



Exportación de los archivo .lnx a archivo .shp

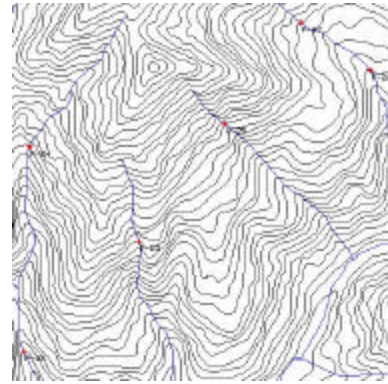
Segundo: una vez que estos archivos estuvieron bajo la extensión .shp se exportaron a la extensión .dxf. Arc View 3.2 en su forma original no tiene un comando que ejecute esta procedimiento, por lo que se tubo que encontrar una rutina que lo hiciera, dicha rutina se bajó de ESRI (<http://arcscript.home.com>) y se

denominó “C – Theme Tools”. Esta rutina se instaló sobre la barra de herramienta y después mediante el comando C – Theme Tools / DXF Tools se exportaron los archivos a Auto Cad tomando en cuenta la base de datos de dichos archivos.



Exportación de los archivo .shp
archivo .dxf

10. Luego se abrieron los archivos de Curvas y drenajes en Auto Cad, se superpusieron ambos en capas diferentes pero en el mismo archivo y se guardo con la extensión .dwg.
11. En este archivo generado se creó otra capa denominada puntos, en la cual se ubicaron los homólogos a los puntos de control. El procedimiento seguido fue el mismo utilizado para obtener los puntos de control en la imagen (Procedimientos 3 al 8).



Homólogos de los puntos de control
en los archivos vectoriales

12. Después de obtener los archivos de coordenadas de la imagen y del vector en EXCEL se determinó la REMC mediante la ecuación:

$$REMC_t = \sqrt{(REMC_x)^2 + (REMC_y)^2}$$

APÉNDICE B

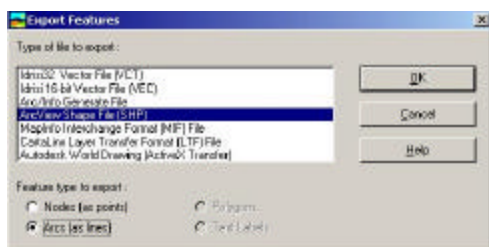
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE FACTORES DE ESCALA EN LA GENERACIÓN DE LOS MDE


APÉNDICE B.1

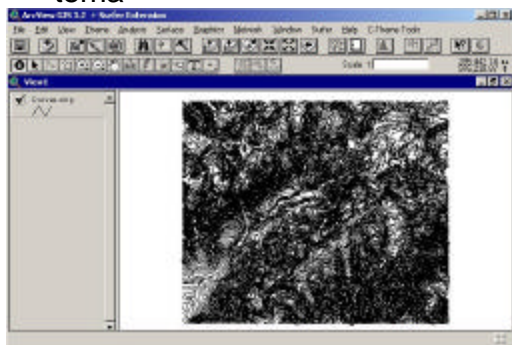
PROCEDIMIENTO EN ARC VIEW 3.2 PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MDE

Procedimiento

1. Los archivos vectoriales utilizados para la construcción de los MDE fueron originados en Cartalinx, razón por la cual se tubo que exportar a Arc View 3.2 mediante el comando File / Export, allí apareció un cuadro de dialogo en el cual se seleccionó la extensión .shp y el tipo de elemento a exportar, en este caso arco (línea).



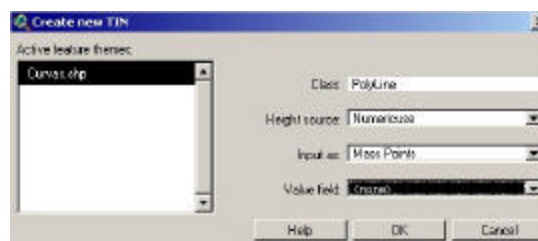
2. Después se abrió Arc View 3.2 y se desplegó el archivo exportado directamente a través del icono  añadir tema



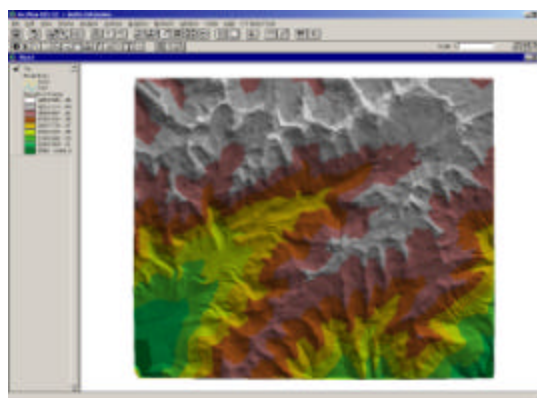
Curvas de nivel desplegadas en Arc View 3.2

3. Con este archivo se construyó el MDE bajo la estructura

vectorial TIN, mediante el comando “Create TIN from Features” menú Surface, de aquí se seleccionó en el cuadro de dialogó el nombre del archivo, la clase de datos en este caso fue poli línea, el campo del valor donde se encuentra la altura en la base de datos de las curvas, se seleccionó Mass Points y el valor del campo se dejó sin nombre.



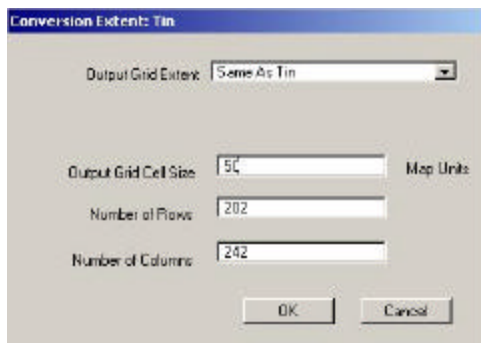
Selección del archivo de curvas y sus características necesaria para la construcción del MDE bajo estructura vectorial.



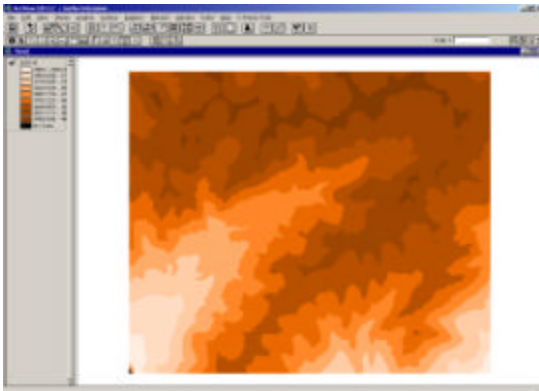
MDE bajo estructura de datos TIN

4. Una vez obtenidos los MDE en estructura vectorial TIN para

cada escala (1/25.000 y 1/100.000) y para cada equidistancia entre curvas de nivel (20, 40, 80, 120 y 200 m), se procedió a convertir a grid con los tamaños de píxel de 1, 10, 15, 20, 30, 50, 100 y 150m, a través del comando Theme / Convert to Grid, aquí se selecciona el MDE TIN, el tamaño de píxel y el numero de filas y columnas del MDE grid y después se le acepto para generar el MDE raster.



Selección del MDE TIN, tamaño de píxel y numero de filas y columnas.





MDE Grid, obtenido del MDE TIN

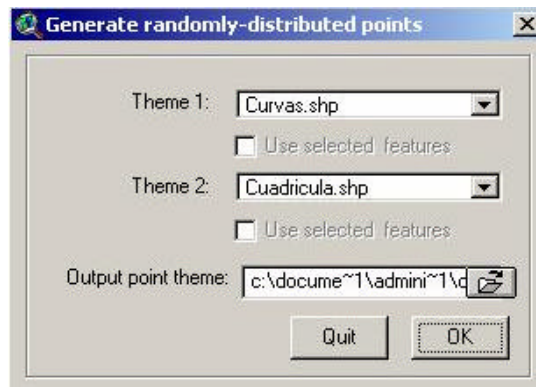
APÉNDICE B.2

PROCEDIMIENTO PARA LA DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL Y DERIVACIÓN DE COTAS EN EL MDE DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO (Criterio Estadístico)

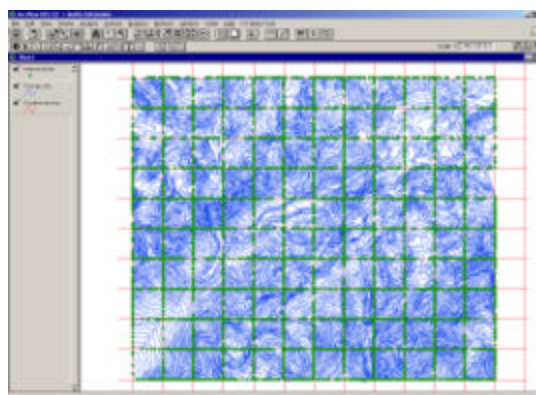
Después de haber generado los diferentes MDE bajo estructura raster se procedió a establecer una metodología para extraer los puntos de control de las curvas nivel digitalizada y sus homólogos en los MDE, con estos datos se determinó la REMC en cada MDE originado.

Procedimiento

1. Se diseñó a través EZYsurf una Rejilla con separación de 1 Kilómetro, la cual fue guardada como archivo .dxf.
2. Luego la rejilla fue desplegada en Arc View 3.2 como archivo .dxf mediante el icono de añadir tema , y se transformó a archivo .shp a través del comando Theme / Convert to Shapefile.
3. Posteriormente la rejilla fue interceptada con las curvas digitalizadas, a través de una rutina obtenida en la biblioteca de rutinas de la ESRI (<http://www.arcscript.home.com>) denominada "Intersect lines" la cual se activa como un icono en la barra de herramientas , ello originó un tema de puntos de control distribuidos de una manera sistemática en todo el área de estudio con coordenadas reticulares UTM.



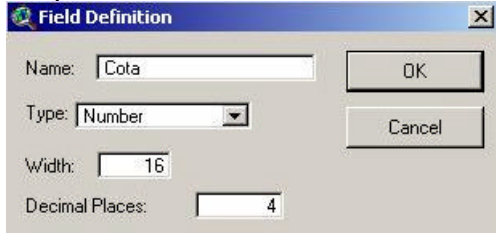
Cuadro de diálogo presentado por la rutina Intersect lines



Tema de puntos generados a través de la intersección de la rejilla y las curvas de control.

4. Ya que este resultado no tenía el valor atributivo Z se realizó un overlay mediante el comando C-Theme Tools / Spatial Analysis Tools / Data Overlay Tool perteneciente a la rutina "Compiled Theme Tools" obtenida de ESRI, dicho overlay se realizó con el tema de puntos y de curvas digitalizadas, para ello se le añadió a la base de datos del tema de puntos un nuevo

campo numérico denominado cota, el cual sirvió para colocar automáticamente mediante el overlay las cotas de las curvas de nivel a dicho tema de puntos.



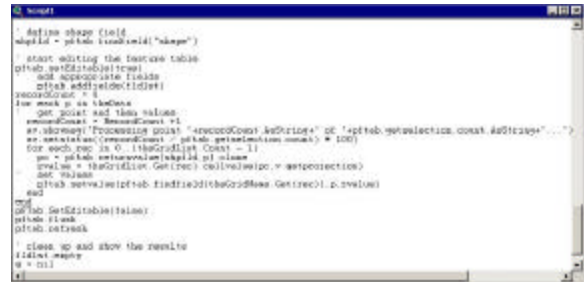
Definición del nuevo campo al tema de puntos mediante su tabla de datos

Shape	ID	X_Coord	Y_Coord	Cota
Point	1	272000.000000	974106.075441	4200.0000
Point	2	272000.000000	975189.880932	4200.0000
Point	3	272292.990931	975000.000000	4200.0000
Point	4	272000.000000	975033.119595	4100.0000
Point	5	272000.000000	975456.888638	4100.0000
Point	6	272086.966906	975000.000000	4100.0000
Point	7	272229.265463	975000.000000	4100.0000
Point	8	272000.000000	975644.744629	4300.0000
Point	9	273000.000000	975642.456910	4300.0000
Point	10	274000.000000	975096.782861	4300.0000
Point	11	274000.000000	975640.419594	4300.0000
Point	12	273375.341841	975000.000000	4300.0000
Point	13	273668.108720	975000.000000	4300.0000
Point	14	273489.966957	975000.000000	4300.0000
Point	15	272000.000000	973841.357174	4300.0000
Point	16	272000.000000	975779.025939	4300.0000
Point	17	273000.000000	973669.549976	4300.0000
Point	18	273000.000000	974563.752194	4300.0000
Point	19	273116.714077	974000.000000	4300.0000
Point	20	272518.853687	975000.000000	4300.0000
Point	21	272000.000000	975640.545229	4160.0000
Point	22	272000.000000	974160.429623	4160.0000
Point	23	272385.961906	975000.000000	4160.0000
Point	24	272000.000000	975612.131581	4160.0000
Point	25	272000.000000	974414.103122	4160.0000
Point	26	272390.423006	975000.000000	4160.0000
Point	27	272000.000000	975492.114996	4140.0000
Point	28	272000.000000	974444.353574	4140.0000
Point	29	272392.139997	975000.000000	4140.0000
Point	30	272000.000000	974370.653529	4160.0000
Point	31	272000.000000	974201.822471	4160.0000
Point	32	272000.000000	975477.039130	4120.0000
Point	33	272000.000000	974669.240256	4120.0000
Point	34	272254.022524	975000.000000	4120.0000
Point	35	272000.000000	975344.573521	4090.0000
Point	36	272000.000000	975103.022479	4090.0000
Point	37	272000.000000	974096.621282	4220.0000
Point	38	272000.000000	975612.427629	4220.0000
Point	39	272160.181451	974000.000000	4220.0000
Point	40	272624.297198	974000.000000	4220.0000
Point	41	272421.854176	975000.000000	4220.0000
Point	42	272000.000000	974000.000000	4220.0000


Tabla de datos del tema de puntos con sus coordenadas X, Y, y su respectiva cota.

5. Una vez obtenido el tema de puntos con sus respectivas cotas, este se utilizó para extraer de manera automática

las cotas homólogas en siete MDE simultáneamente, mediante la compilación de un scripts denominado "gridstack" de la biblioteca de rutinas de la ESRI, para esto se cargó el script a través del comando Script / Load Text File el archivo gridstack.ave



Despliegue del Script gridstack.ave

6. Después que se desplegó el Script gridstack.ave se compilo mediante el icono  y se corrió a través del comando Scprit / Run, seleccionando el tema de punto y los MDE

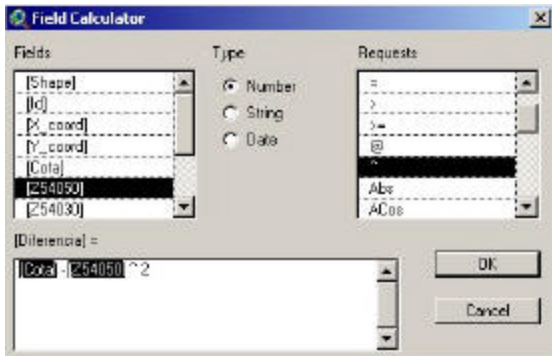
Base de datos del tema de puntos con los resultados de la extracción de la cota en cada MDE.

7. Después de obtener las cotas de los diferentes MDE se procedió a calcular la Raíz del

Error Medio Cuadrático junto con las cotas del tema de puntos, este proceso se realizó en la misma base de datos del tema de punto y en Arc View 3.2, generando un campo de diferencia de cota elevadas al cuadrado entre las cotas del MDE y las cotas del tema de



puntos, mediante el icono calculador de campos.



Sintaxis empleada para calcular la diferencia cuadrática de las cotas de los puntos de control y las de un MDE.

8. Posteriormente a dicho campo se le pidió los estadísticos a través del comando Field / Statistics, y al valor de la media se le extrajo la raíz cuadrada, obteniendo así el valor de la REMC para cada MDE.



Valor de la media utilizado para calcular la REM

APÉNDICE B.3

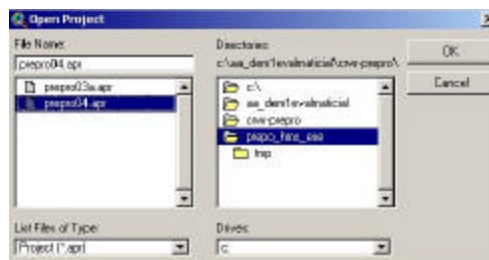
PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE RED DRENAJE EN LOS MDE MEDIANTE CRWR-PREPRO

Una vez construido los MDE, se procede a aplicar el algoritmo de delineación de drenaje, para este caso se utilizó el CRWR-PrePro (Olivera, 1999), el cual es un sistema de rutinas de ArcView, desarrollado para la extracción topográfica, topología e información hidrológica de datos espaciales digitales, y para preparar archivos ASCII de entrada al modelo HEC-HMS (Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC)) del Cuerpo de Ingenieros del Ejercito de los Estados Unidos (USACE) quienes desarrollaron el Sistema de Modelado Hidrológico (HMS).


Para generar automáticamente los drenajes superficiales y delimitar, en función de estos las sub-cuencas.

Procedimiento

1. El modulo de modelado hidrológico CRWR-PrePro, funciona mediante la apertura de un proyecto denominado prepro04.apr, este proyecto aparece automáticamente en la barra de herramientas dos menús, uno denominado CRWR-PrePro y el otro CRWR-Utility.



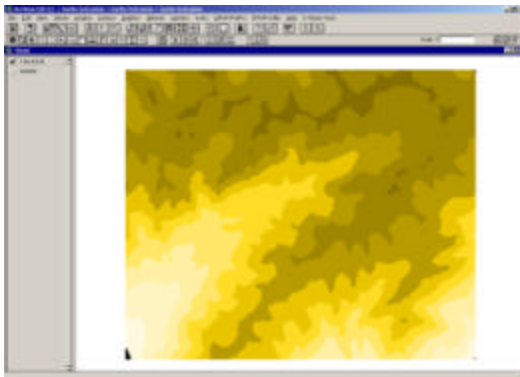
Apertura del proyecto de simulación hidrológica CRWR-PrePro

2. Una vez desplegado el proyecto se guardó mediante el comando File / Save Project As... con el nombre "drenaje".
3. En este proyecto se desplegó, mediante el comando de añadir tema , el MDE al cual se le iba a simular el drenaje superficial.
4. Una vez desplegado el MDE se procedió a utilizar las rutinas que tiene el CRWR-PrePro, empezando con el proceso del llenado de sumideros o depresiones del terreno mediante el comando CRWR-PrePro / Fill Sinks. Este consiste en el principio de los ocho puntos vecinos, original de Jensen y Domingue (1988), mediante el cual el valor del píxel del centro tiene que ser mayor a uno o varios sus vecinos para que drene su flujo hacia el menor de ellos, de no ser así el algoritmo se encarga de cambiarle el valor

al píxel del centro.

32	64	128
16	☩	1
8	4	2

Esquema de codificación de la dirección del flujo Jensen y Domingue (1988).

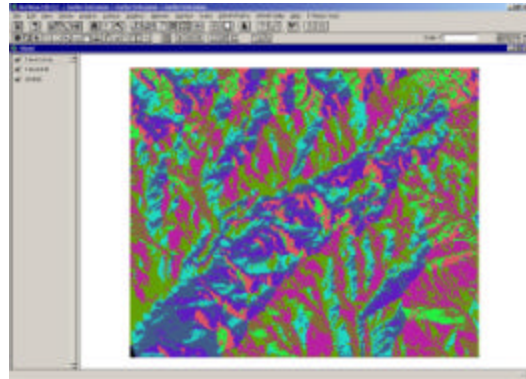


MDE sin depresiones en su estructura.

- Una vez generado el nuevo MDE sin depresiones, se procedió a definir la dirección de flujo a través del comando CRWR-PrePro / Flow Direction.

2	2	2	4	4
2	2	2	4	4
1	1	2	4	8
128	128	1	2	4
128	128	1	1	4

Esquema utilizado para determinar la dirección de flujo.

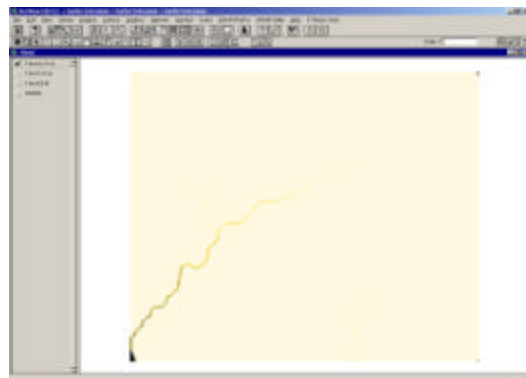


Cobertura de la determinación de la dirección de flujo

- Luego procedemos a determinar la acumulación de flujo mediante el comando CRWR-PrePro / Flow Accumulation, este consistió en determinar la cantidad de píxeles que aportan su drenaje a una celda dada, como se aprecia en la siguiente figura:

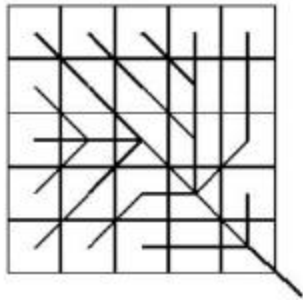
0	0	0	0	0
0	1	1	2	1
0	3	8	5	2
0	1	1	20	0
0	0	0	1	24

Esquema utilizado para determinar el flujo acumulado.

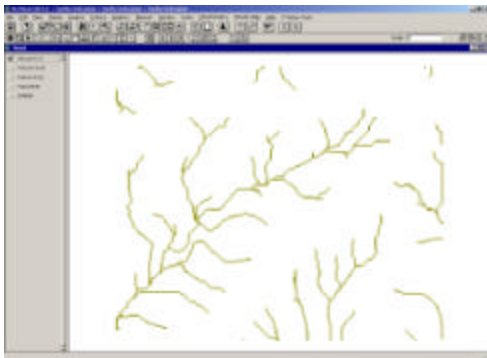


Cobertura de la determinación del flujo acumulado.

7. Luego se define el umbral de celdas que permite establecer el numero de celda a partir del cual se va a generar el drenaje aguas arriba, dicho umbral para este caso fue de 250 celda, este proceso se realizó mediante el comando CRWR-PrePro / Stream Definition (Threshold).

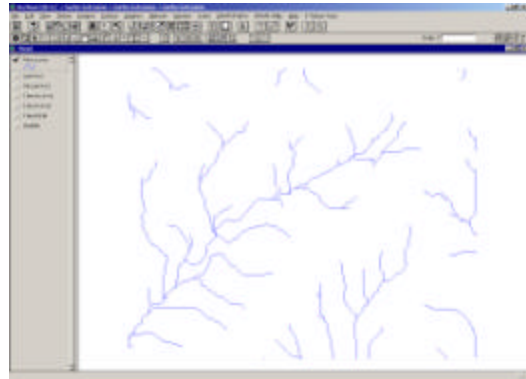


Definición de la red de drenaje a través de un umbral de 250 celdas



Red de drenaje generada en formato raster

8. Por último se convierte a archivo con extensión .shp para evaluar dichos drenajes.



Drenajes vectorizado mediante CRWR-Utility

APÉNDICE B.4

METODOLOGÍA UTILIZADA PARA DETERMINAR LA MEDIDA DE DESPLAZAMIENTO DE LA RED HIDROGRÁFICA GENERADA

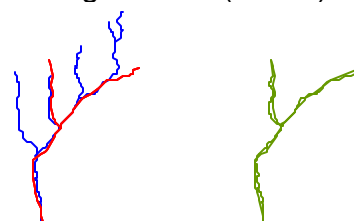
Procedimiento

1. Una vez generada la red de drenaje con el programa, se exportó a AtuoCad Map 2000i mediante el comando C-Theme Tools / DXF tools / Shape 2 DXF-2 perteneciente a la rutina "Compiled Theme Tools" obtenida en la biblioteca de rutinas de ESRI
2. De manera similar los drenajes mapeados (ya vectorizados) se exportaron a AtuoCad Map 2000i 2000i.
3. Posteriormente se desplegaron dichos drenajes en AtuoCad Map 2000i como archivos .dxf, y se guardaron ambos en un solo archivo con extensión .dwg pero en capas diferentes, allí se procedió con la siguientes edición:
 - 3.1 A objeto de formar polígonos entre las dos redes hidrográficas, se procedió a unir las en los extremos.



Unión de los drenajes originales (rojo) y generados (azul)

- 3.2 Simultáneamente, se eliminan los segmentos sobrantes de la red generada a partir del MDE, a objeto de hacerla equivalente a la red digitalizada (vector).



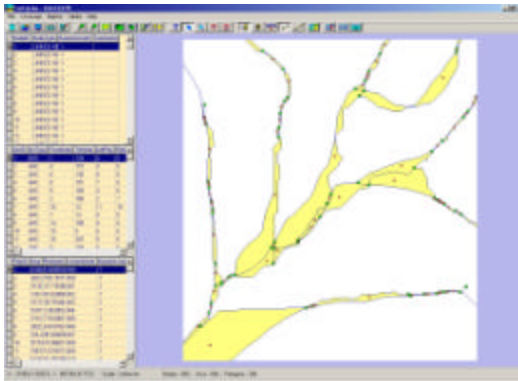
Eliminación de segmentos sobrantes

4. Este archivo editado fue guardado bajo la extensión .dxf de la versión Auto Cad 14, para que pudiera ser reconocido por Arc View 3.2.
5. Una vez reconocido y desplegado este archivo en Arc View 3.2 con extensión .dxf se transformo a archivo .shp a través del comando Theme / Convert to Shapefile para que pudiera ser importado por Cartalinx mediante el comando File / Import.
6. En Cartalinx se abrió el archivo importado y se proceso de la siguiente manera:
 - 6.1 Se removieron todos los pseudo nodos a través del comando Coverage /

Remove Pseudo – Nodes

6.2 Después se mando a generar todas las intersecciones con el comando Coverage / Create Intersecciones

6.3 Y por ultimo se construyeron los polígonos mediante el comando Coverage / Build Polygons



Construcción de Polígonos

7. Al obtener el archivo con los polígonos generados, en su base de datos aparece el numero total de polígonos construidos con sus respectivos perímetros y áreas.

PolyID	Area	Perimeter	LocatorNod
1	0.94042252948975	6.86955389	399
2	369.207207581033	158.181737	400
3	15.3087099584136	27.7163680	401
4	138.704429199372	83.4280681	402
5	19.7779719406726	30.7534444	403
6	5.87767249278386	2.94395240	404
7	219.261757538756	179.808218	405
8	3832.09633006435	618.078242	406
9	164.477568254653	90.8490969	407
10	57.5402919995731	74.9960199	408
11	196.573711374744	123.501193	409
12	13.9932867898776	51.2519882	410

Base de datos generada en Cartalinx Automáticamente mediante la construcción de los

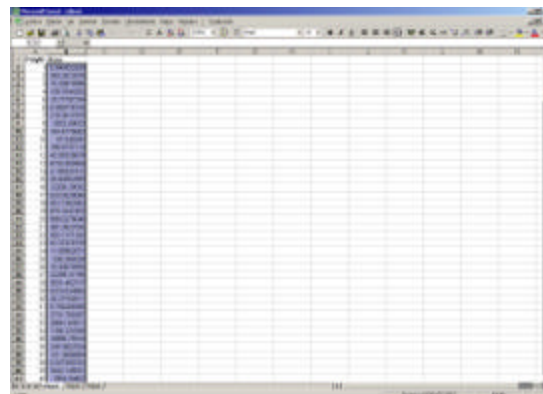
polígonos

8. Como la base de datos generada por Cartalinx es una Aplicación de Microsoft Access, esta se importó por la hoja de cálculo de Microsoft Excel mediante el comando Datos / Obtener datos externos / Nueva consulta de bases de datos, aquí apareció un cuadro de dialogo que nos permitió elegir el origen de los datos, el nombre a la consulta de los datos y el archivo Access al cual se le realizó la consulta, este ultimo tenia tres alternativa generadas por Cartalinx: Nodos, Arcos y Polígonos, de la cual se escogió la de polígono con sus campos de identificación y área.

9. Al culminar con estos pasos se desplegó en pantalla de forma inmediata los campos de identificación de polígonos y de área, se realizó la sumatoria a través del icono



seleccionando dicha columna.



Selección del campo del área para realizar la sumatoria

10. Una vez realizada la sumatoria del campo correspondiente al área se tomó dicho dato para comparar con las demás áreas de los drenajes generados y así poder concluir bajo este criterio hidrológico cuales fueron los MDE que generaron los drenajes más parecidos a los del mapa fuente, digitalizado y vectorizado.

APÉNDICE C

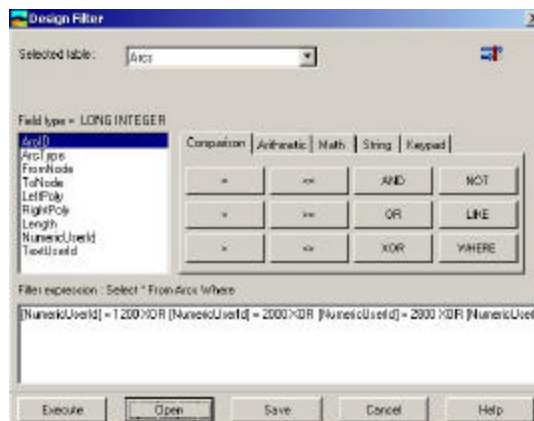
EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MDE

APÉNDICE C.1

CREACIÓN DE LOS PUNTOS ACOTADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS MDE

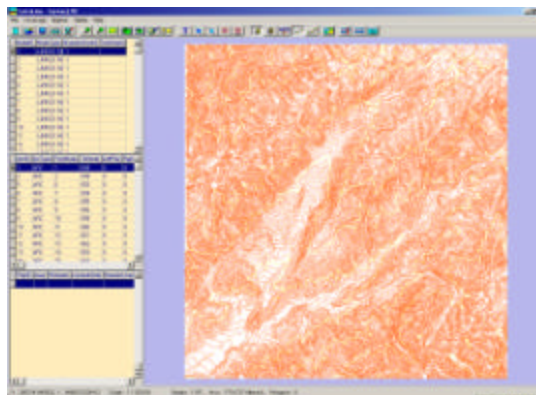
Procedimiento

1. Se digitalizó, mediante Cartalinx y utilizando el método de pantalla las curvas de nivel cada 40 m de equidistancia y a escala 1/100.000 (apéndice A.1) de toda zona en estudio.
2. Después en el mismo Cartalinx se diseñaron dos filtros, uno para extraer las curvas cada 800 metros (1200, 2000, 2800, 3600 y 4400) que serán las curvas de control para comprobar la calidad de los MDE generados y el otro para extraer todas las curvas, excepto las curvas señaladas anteriormente, que constituyen los datos de entrada para generar los MDE a través de diferentes métodos de interpolación.
3. Estos filtros se originaron con el comando Table / Design Filter, donde se desplegó un cuadro de dialogo, en el cual se seleccionó la tabla de datos de arcos y el campo del valor numérico de la cota para originar la sintaxis de exclusión de las curvas ya mencionadas con el comando XOR.



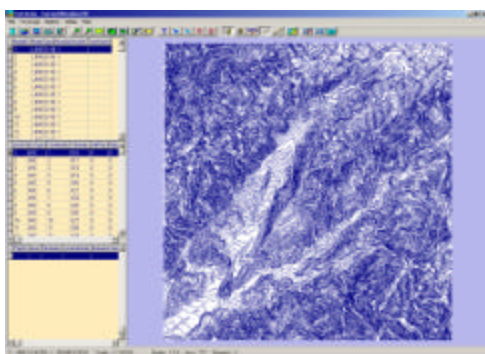
Sintaxis utilizada para excluir las curvas cada 800 metros.

4. Una vez originada la sintaxis de exclusión se guardó en la carpeta de trabajo y se ejecutó el filtro.



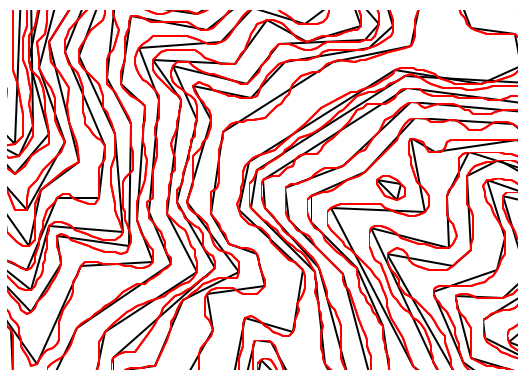
Curvas de nivel seleccionadas por el filtro cada 800 metros.

5. Posteriormente se guardó dicho archivo en otra nueva cobertura a través del comando Table / Copy filtered features to new coverage, y se desplegó como un nuevo archivo.



Todas las curvas de nivel menos las filtradas cada 800 metros.

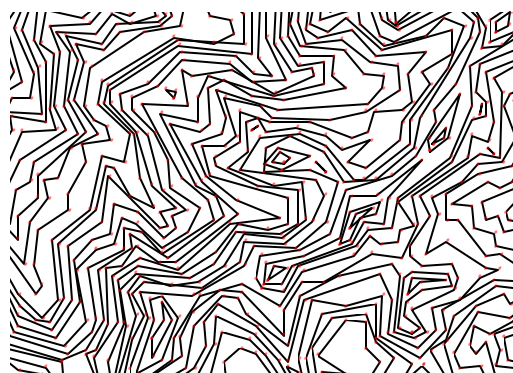
6. Estas curvas filtradas se exportaron como archivo .shp mediante el comando File / Expot.
7. En Arc View 3.2 se abrió dicho archivo de curvas para reducirle los vértices mediante una rutina denominada "C-Theme Tools" obtenida en la biblioteca de rutinas de la ESRI (<http://arcscript.home.com>); de esta rutina se utilizó el comando C-Theme Tools / Misc. Tools / Simplifies a shape / Remove vértices. Se aplicaron dos tolerancias para reducir los vértices : de 20 y 50 m; en cada caso se originó un archivo clon de las curvas que se transformó a archivo shape.



Curvas originales (rojas) y curvas

con una reducción de vértices de 50 m (negra)

8. Luego, los archivos generados se transformaron a puntos, con el comando C-Theme Tools / Shape Tools / Poly(gon)(line) to Points, esto generó un tema de puntos con las coordenadas X, Y y Z, para cada uno.



Curvas con una reducción de vértices de 50 m (negra) y puntos (rojos) obtenidos a través de ellas.

9. Igual procedimiento se aplicó para las curvas de control (las extraídas cada 800 m).

APÉNDICE C.2

CONSTRUCCIÓN DE LOS MDE CON LOS DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN


Después de generar las dos bases de datos de puntos acotados, se procedió a aplicar los diferentes métodos de interpolación y con un tamaño de píxel de 25 m en cada caso. Los métodos TIN, Inverso a la Distancia (IDW), Spline Regularizado y Spline con Tensión, fueron aplicados con Arc View 3.2, mientras que INTERCON con IDRISI 32 y Kriging con Surfer 8.

Procedimiento

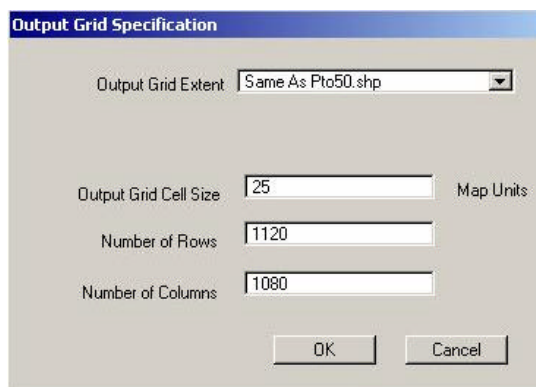
MÉTODO DE INTERPOLACIÓN TIN

Para construir un MDE mediante el método de interpolación TIN, se utilizó el mismo procedimiento señalado en el apéndice B.1, pero utilizando en este caso el conjunto de puntos acotados.

MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DEL INVERSO AL CUADRADO DE LA DISTANCIA (IDW)

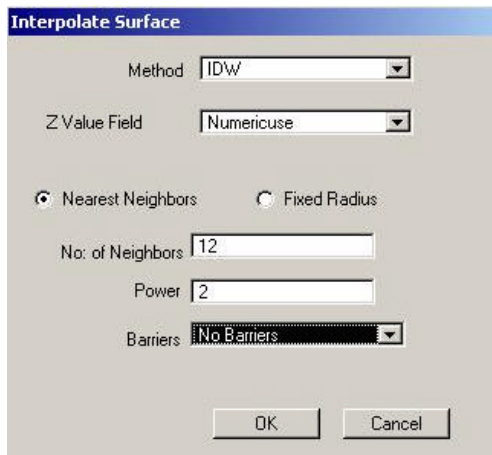
1. Para utilizar este método se necesitó activar dentro de Arc View 3.2 la extensión Surface
2. Una vez activado esta extensión se desplegó el tema de puntos con el icono  añadir tema
3. Posteriormente mediante el comando Surface / Interpolate Grid se procedió a interpolar

dichos puntos, allí apareció un cuadro de diálogo donde se seleccionó el tema de puntos, el tamaño de píxel, el número de filas y columnas, de la imagen grid que se iba a generar.



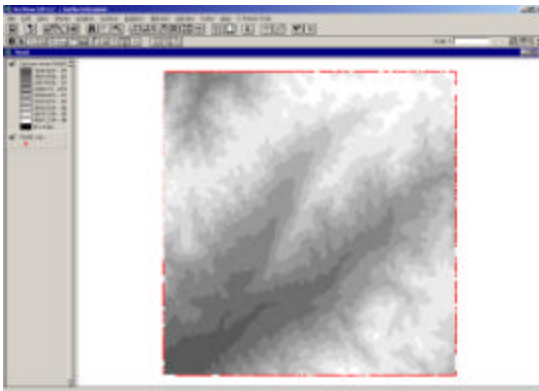
Cuadro de especificaciones del tema de entrada y del tema de salida

4. Después de haberle dado todas las especificaciones aceptamos a través del botón OK, y automáticamente aparece un nuevo cuadro de diálogo donde se seleccionó la interpolación IDW, el campo de valores numéricos, el número de puntos cercanos a utilizar en la interpolación y la potencia exponente del método: igual a 2 para indicar inverso de la distancia al cuadrado.



Definición del método de interpolación IDW

- Al aceptar los parámetros se realizó el proceso de interpolación, resultando una grid (raster).

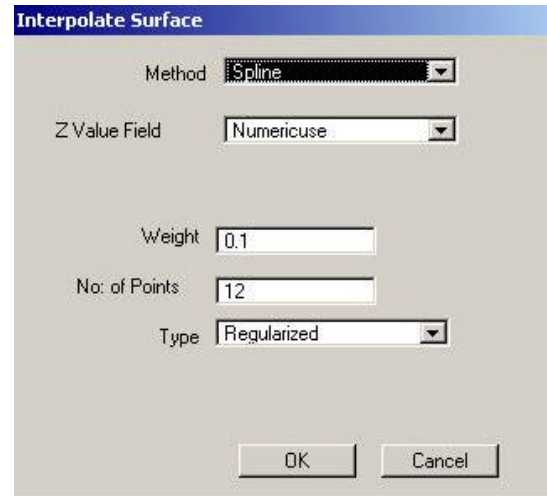


MDE originado mediante el método de interpolación IDW

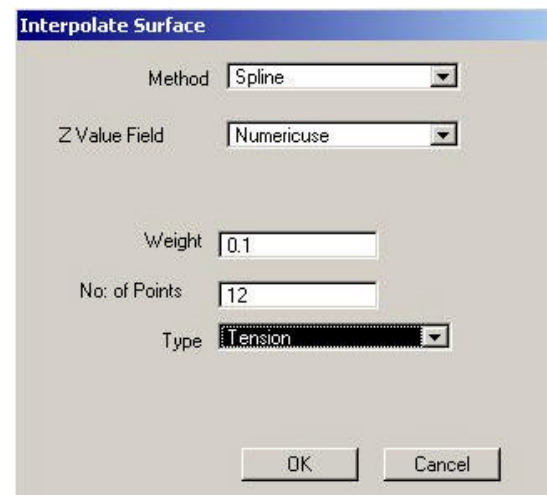
MÉTODO DE INTERPOLACIÓN SPLINE REGULARIZADA Y CON TENSIÓN.

Para emplear los métodos de interpolación Spline Regularizada y con Tensión se utilizaron los primeros tres pasos del método anterior, después se desplegó automáticamente un cuadro de diálogo y se seleccionó el método de interpolación Spline con el campo del valor numerico, allí se utilizó el tipo

Regualizado y después el tipo con Tensión para generar los MDE con estos dos métodos, el resto de los datos se dejaron por defectos en ambos casos.



Definición del método de interpolación Spline Regularizado.

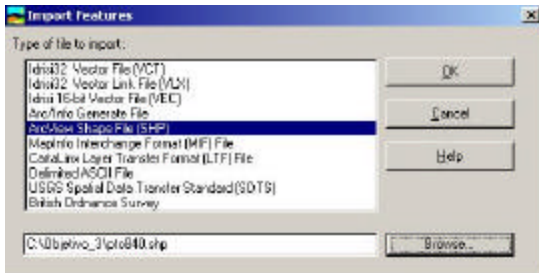


Definición del método de interpolación Spline con Tensión.

MÉTODO DE INTERPOLACIÓN INTERCON (Interpolación Lineal).

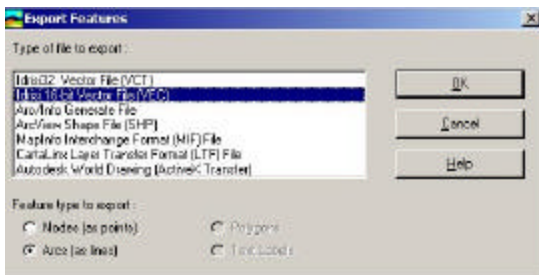
- Para emplear este método se importó a Cartalinx las dos bases de datos de puntos acotados, diseñadas en el

apéndice C.1 bajo la estructura vectorial de Polylineas, mediante el comando File / Import / ArcView Shape File (SHP).



Importación de los archivos Shape a Cartalinx.

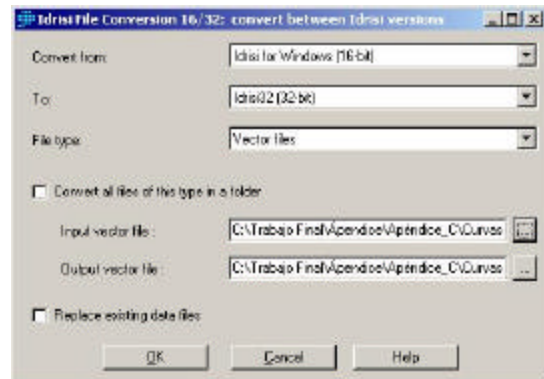
2. Luego dichos archivos se exportaron a Idrisi versión 16 para conservar en su base de datos el campo numerico de la cota de cada curva, esto se realizó mediante el comando File / Export y bajo la opción Arco.



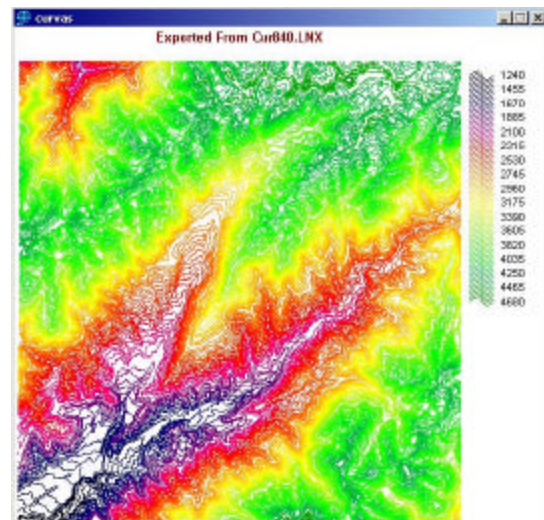
Exportación de los archivos Cartalinx a IDRISI 16.

3. Posteriormente en IDRISI 32 y bajo el comando File / Idrisi File Conversion 16/32: Convert Between Idrisi versions, se convirtió el archivo exportado en Cartalinx bajo la versión IDRISI 16 a IDRISI 32, allí se desplegó un cuadro de diálogo donde se seleccionó la conversión de la versión 16 a 32, de igual manera el tipo de

archivo que fue vectorial y la ruta del archivo a transformar.

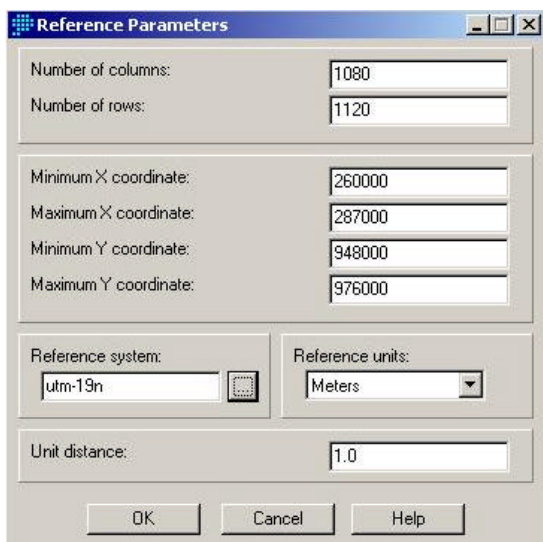


Conversión del archivo IDRISI 16 a IDRISI 32.



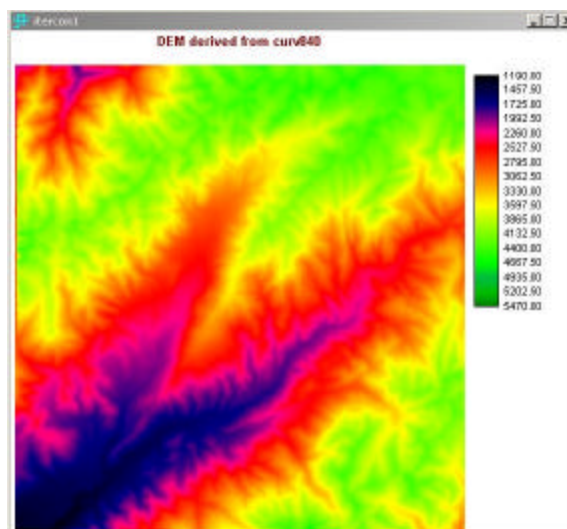
Archivos de curvas con sus base de datos en IDRISI 32.

4. Después se genero una imagen en blanco donde se le definió los parametros espaciales individuales: numero de filas y columnas, coordenadas mínimas y máximas de X e Y, sistema y unidades de referencia y unidad de distancia. Este procedimiento se realizó a través de la rutina Data Entry / INITIAL.



Parametros de referencia utilizado para generar la imagen en blanco.


5. Con esta imagen originada se transformó las curvas de nivel vectorizada a raster mediante el comando Reformat / Raster / Vector Conversion / LINERAS.
6. Luego con el archivo de curvas raster y el comando Data Entry / Surface Interpolation / INTERCON se generó el MDE con el método de interpolación INTERCON, colocándole el valor de altura de la esquina superior derecha e izquierda y el valor de altura de la esquina inferior derecha e izquierda.

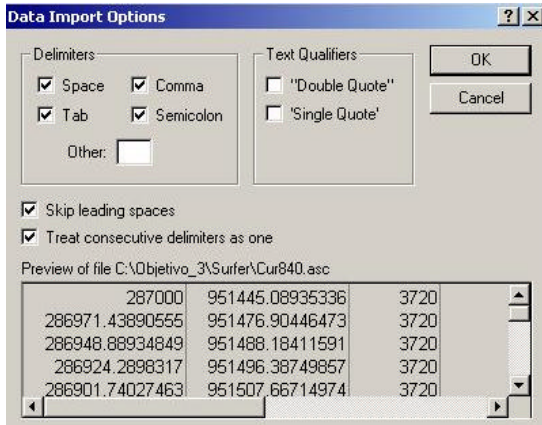


MDE generado a través del método de interpolación INTERCON.

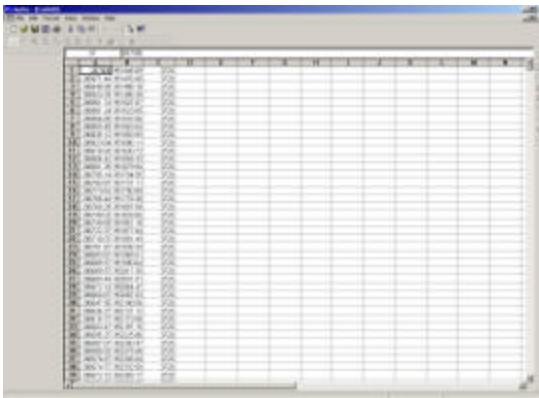
MÉTODO DE INTERPOLACIÓN KRIGING (Surfer 8).

1. Como la base de datos utilizada para la construcción de los MDE se encontraba en Arc View 3.2 fue necesario exportarla a Surfer 8. Dicho procedimiento se realizó en dos pasos: primero se exportó el archivo .shp de Arc View 3.2 a .dxf de AutoCad, esto se llevo a cabo a través de la rutina "C-Theme Tools" obtenida en la biblioteca de ESRI (<http://arcsript.home.com>) y segundo mediante el comando Write XYZ to File del modulo "EZYsurf" de Auto Cad esto permitió transformar el archivo vector de puntos a una archivo ASCII de texto para poderlo importar a Surfer 8, donde se procedió a generar el MDE con el método Kriging.
2. En Surfer 8 se importó el archivo ASCII de texto

utilizando el comando  la nueva hoja de calculo y seleccionando en tipo de archivo, todos los archivos para poder reconocerlo y darle la delimitación del texto, espacio, coma y tabulador de los campos de la base de datos a importar.



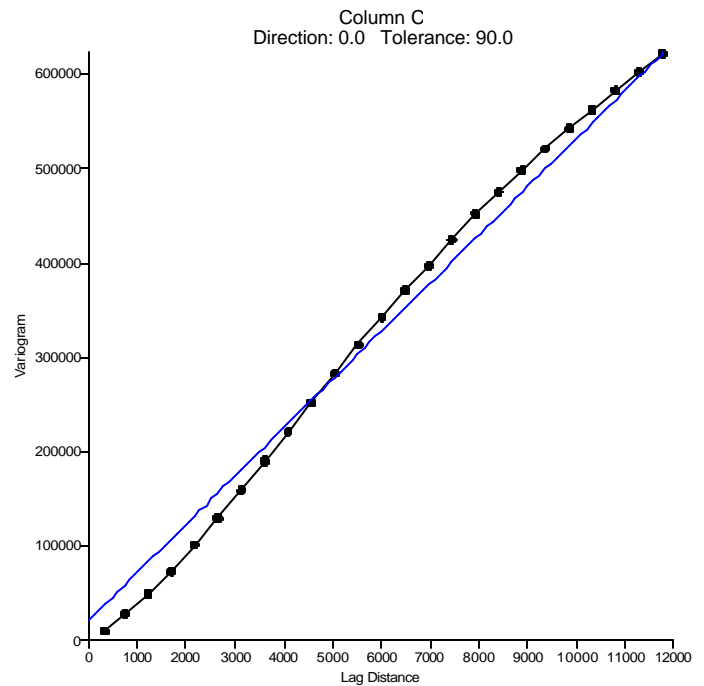
Parametros utilizados para importar el archivo ASCII dfe texto a la hoja de calculo de Surfer 8.



Base de datos importada a Surfer 8.

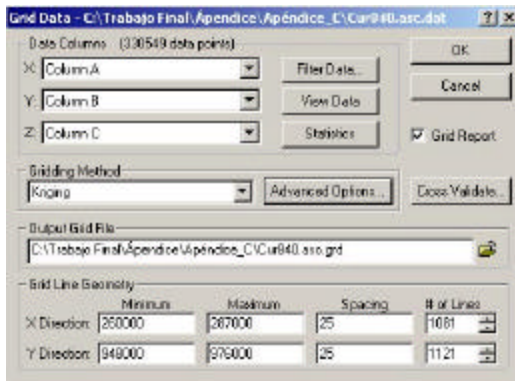
3. Una vez desplegada la base de datos en Surfer 8 se guardó como archivo de hoja de calculo de Surfer.
4. Con este archivo de hoja de calculo y mediante el comando Grid / Variogram / New

Variogram, se construyo el variograma experimental que utilizamos para generar el MDE con el método Kriging.

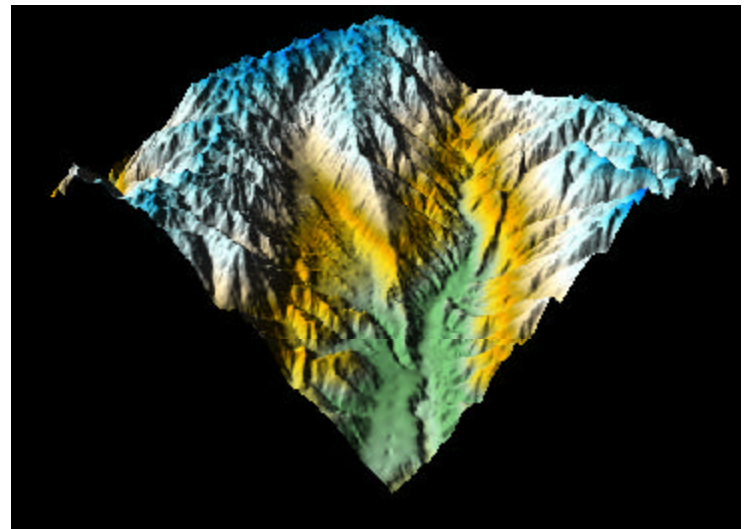


Variograma experimental utilizado para generar el MDE mediante el método de interpolación Kriging.

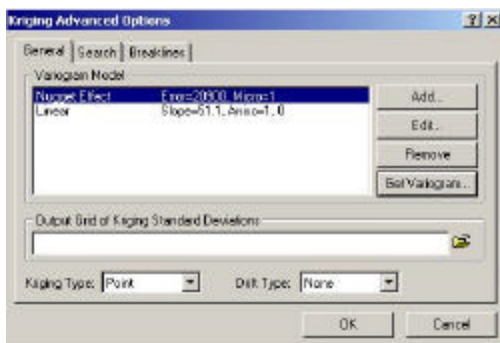
5. Con la base de datos importada y el variograma generado se construyó el MDE con el método de interpolación Kriging, utilizando el comando Grid / Data se desplegó un cuadro de diálogo en el cual se indicó el valor X, Y y Z en cada campo de la base de datos, el método de interpolación a utilizar (kriging) con el variograma experimental, el valor X e Y mínimo y máximo así como también el tamaño del pixel a utilizar (25 m).



Datos utilizados para la construcción del MDE con el método de interpolación Kriging.



MDE generado a través del método de interpolación Kriging.



Utilización del variograma experimental en la construcción del MDE con el método Kriging.

6. Luego se aceptó la opción con dichos parámetros y se generó el MDE mediante esta metodología.

APÉNDICE C.3

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO PARA EVALUAR LOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

Procedimiento

DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE LA RED DE DRENAJE

Para realizar la delineación automática de la red de drenaje se utilizó el programa CRWR-PrePro (Olivera, 1999), dicho procedimiento de delineación esta señalado en el apéndice B.3.

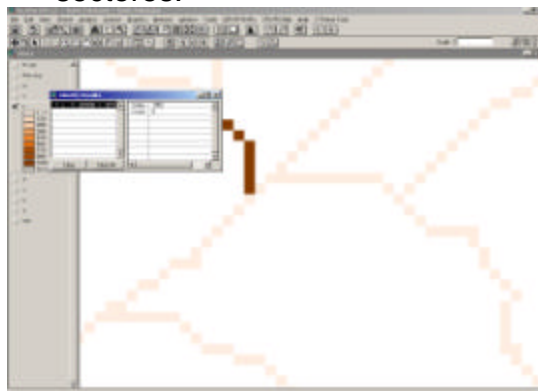
DELINEACIÓN AUTOMÁTICA DE LA DIVISORIA DE SUB - CUENCA

1. Después de delinear la red de drenaje se procedió a generar la divisoria de la sub-cuenca en el mismo proyecto, para ello se originó el tema LinkGrid mediante el comando Stream Segmentation (Links).



2. De ese tema generado se seleccionó el píxel de desembocadura de drenaje o de cierre de cuenca, localizado mediante el identificador el flujo acumulado. Este procedimiento se realizó de igual forma ubicando dos puntos aguas arriba para el

análisis morfométrico en tres sectores.



Selección del píxel de desembocadura de drenaje o de cierre de cuenca.

3. Una vez identificado el píxel de arranque se fue a la base de datos y se eliminaron el resto de píxeles.

Value	Count
1052	8

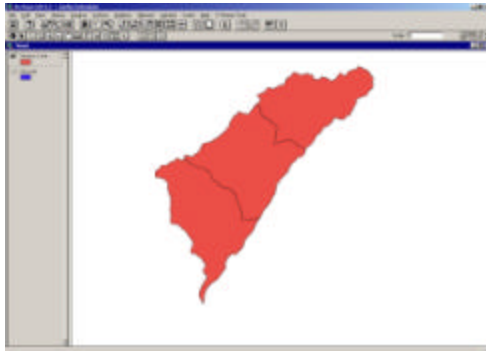
Base de datos eliminada

4. Posteriormente se generó el tema LinkGrid con el modificado mediante el comando Outles from Links.



5. Con este tema generado se delineó la sub cuenca con al comando Sub - Watershed

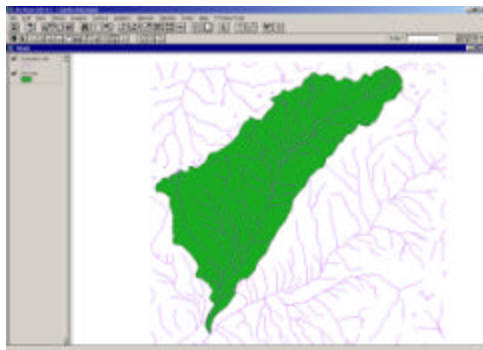
Delineation y se vectorizó mediante Vectorize Streams and Watersheds.



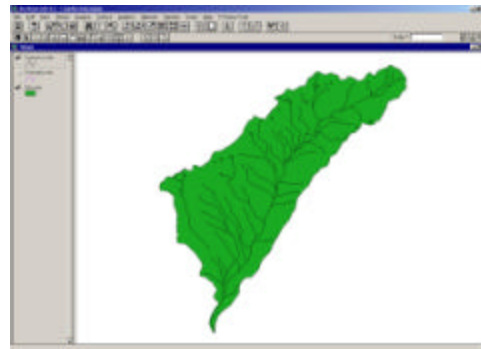
Divisoria de cuenca total y de sus tres secciones generada automáticamente.

CALCULO DE ÁREA DE SUB-CUENCA Y LONGITUD DE CAUCE

10. Después de generada la divisoria de sub-cuenca se interceptó con la red de drenaje originada para obtener solo el drenaje perteneciente a la cuenca y a sus tres sectores, este procedimiento se realizó mediante el comando View / GeoProcessing Wizard / Clip one Theme base on another.



Divisoria de cuenca y red de drenaje total generada



Drenaje extraído a través de la divisoria de cuenca.

11. Posteriormente se consultó el área de la cuenca a través de la revisión de su base de datos, donde aparece el área en uno de sus campos.

Attributes of Divi.shp		
Shape	Field	Area
Polygon	1.000000	190925244.186099

Área de la cuenca consultada a través de la base de datos.

12. De una manera similar a la anterior se adquirió la longitud de drenaje, pero con la salvedad de que el campo de longitud se le pidió las estadísticas seleccionando dicho campo, esto se realizó a través del comando Field / Statistics.

Statistics for Length field	
Sum:	208867.121238
Count:	120
Mean:	1740.559344
Maximum:	8785.753410
Minimum:	131.126822
Range:	8654.626588
Variance:	2255001.019843
Standard Deviation:	1501.666081

Longitud de cauce total.