METODOLOGÍA PARA LA CONFECCIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO A PARTIR DE CURVAS DE NIVEL Y COTAS

Carlos G. Pattillo *
Consuelo S. Castro
*Centro de Percepción Remota y SIG
**Instituto de Geografía
Pontificia Universidad Católica de Chile
Proyecto FONDECYT 1990586
Vicuña Mackenna 4860
cpatillo@puc.cl
consuelo@puc.cl

RESUMEN

La mayoría de los estudios sobre recursos naturales y la espacialización de variables climáticas, requieren de información detallada sobre las características físicas del terreno, representada por sus pendientes, exposición de laderas y rangos de altura.

A pesar de que existen técnicas modernas de obtención de un MDE, mediante fotogrametría digital, radargrametría e interferometría, para la mayoría de los usuarios, la información disponible normalmente proviene de una carta topográfica cuyas curvas de nivel y cotas se digitalizan y manejan en un SIG para generar un MDE.

Las discusiones hasta ahora se han centrado en el método de interpolación de estos datos topográficos (Kriging, TIN, etc.) sin embargo, cuando se evalúa la calidad de los resultados, en un 95% de los casos estos son malos. Es decir, cualquiera sea el método de interpolación utilizado, a partir de este MDE no se pueden generar curvas de nivel parecidas a las originales (salvo en terrenos con pendientes homogéneas), el drenaje pasa por laderas o su curso sube y baja cerros artificiales y los lagos son inclinados. Lógicamente, las pendientes derivadas de este modelo distan mucho de la realidad.

Para hacer un buen modelo digital de elevación, se requieren más datos y más importante aún, saber donde agregar estos datos adicionales.

Como paso lógico en el mejoramiento de los datos, se utiliza la red de drenaje donde los ríos, esteros y quebradas, son elementos bordes de la interpolación y los lagos, lagunas y océanos son elementos duros es decir, la interpolación no atraviesa dichos elementos. El problema que surge es ¿cómo determinar la cota que debe tener cada vértice del drenaje?.

Esto se ha solucionado en algunos SIG de la siguiente forma: se genera un primer MDE en forma tradicional, se sobrepone el drenaje y se lee su cota del MDE y luego se genera un segundo MDE sumando el drenaje con alturas, como otra capa más de información. Aunque este proceso mejora notablemente los quiebres naturales del terreno, se debe tener en cuenta que las alturas asignadas no son las óptimas (la calidad de la interpolación es baja) y que la red de drenajes de una carta topográfica no está, casi nunca, completa.

Falta sin embargo, representar otros quiebres del terreno, como por ejemplo el producido por las divisorias de aguas y representar además, las tendencias del terreno en zonas planas, es decir, faltan muchos más datos, sin los cuales el MDE final difícilmente será de buena calidad.

Esto obligatoriamente significa ingresar nuevos datos de altura, interpolados a partir de las curvas de nivel y pensados de tal forma que orienten adecuadamente el proceso de interpolación automática posterior.

Interpolar a mano nuevos puntos es una tarea tan grande y tediosa que en la práctica nadie lo hace y por lo tanto se usan MDE de pésima calidad y lo grave es que éstos son utilizados como datos de entrada a modelos y simulaciones cuyos resultados se utilizan en la toma de decisiones.

En esta presentación, se expone una metodología de ingreso de nuevos datos, con alturas interpoladas automáticamente a partir de las curvas de nivel y localizadas con el apoyo de una imagen de satélite ortogeorreferenciada. Para ello se utiliza una aplicación desarrollada en lenguaje Avenue de Arc-View, que permite la asignación de cotas reales a la red de drenajes y el ingreso de líneas en 3D (vértices con coordenadas x,y,z,m, donde "z" es la altura y "m" es la distancia al origen o al vértice anterior) para las divisorias de aguas y otros elementos característicos del terreno.

Se presenta, mediante ejemplos reales, los errores comunes de interpolación de los MDE simples o tradicionales, los pasos a seguir en el ingreso de nueva información que permita su correcta interpretación por el programa de interpolación y la comparación de resultados con un MDE confeccionado utilizando la metodología propuesta.

SUMMARY

Almost all studies about natural resources and the spacialization of climatic variables require detailed information of the phisical characteristic of the terrain, mainly through slope, aspect and height ranges derived information.

Allthough modern techniques can be used to create a DEM, as digital photogrammetry, radargrammetry and interpherommetry, most users uses digitized contour lines from a topogrphic chart to create their DEM's.

Still now discussion and explanation has been focus on the interpolating methods (Kriging, TIN, etc.) but independently of the method used, when the model is evaluated 95% of the cases the result is not adecuated. This means that contour lines derived from these models, except from homogeneous slopes, does not represent reality as was depicted by the topographic chart and slopes, aspect neither.

The construction of a good DEM required more information to be entered, smartly localized to prevent interpolation errors.

A logic step is to used the hidrographic information, also present in the topographic chart, considering rivers and creeks as soft elements and lakes and other water bodies as hard elements. The problem is how to obtain the height for each vextex of a drenaige?.

This question has been solved by some GIS softwares (Arc-Info) by making a first DEM, getting the height for the drenaige from this preliminary DEM and then using this 3D dreinage to control the construction of the new DEM. The problem is the height obtained from the preliminary DEM are not the real ones, but the result is much better than not using them. But the problem still remains because hidrography in topographic chart is not always drawn in detailed.

But there are other terrain characteristics that has to be explicity marked (water divisory) and this means we still have to input new height data interpolated from contour lines. Doing this by hand is almost impossible and a tedious job, so it is never done.

A methodolgy that allow the input of new height data automatically interpolated from contour lines is presented. This application was done in Arc-View 3.1 using its ability to work with vertex with four coordinates (x,y,z,m), "z" representing height and "m" the distance from an origin or previous vertex.

Real examples using this methodology that shows the commun errors made by simple or traditionals DEM discussed and presented.

1.- Introducción

Cuando se requiere evaluar las condiciones ambientales del territorio, expresadas a través del conocimiento y manejo de variables bióticas y abióticas, la topografía o formas del relieve juegan un papel preponderante en el comportamiento de dichas variables.

La radiación solar, la temperatura, los campos de viento, el escurrimiento, la erosión, las precipitaciones, son sólo algunos ejemplos de variables en las cuales, la topografía modifica o regula su comportamiento.

Modelar la superficie de la Tierra y a partir de este modelo derivar la información necesaria para conocer los factores que modifican las variables ambientales, la formación de ecosistemas y muchos fenómenos que sería largo enumerar, es claramente una necesidad de primer orden. Para esto es fundamental contar con datos de altura (puntos con coordenadas X,Y,Z), cuya densidad sea lo suficientemente alta y precisa, relativa a los objetivos de uso y aplicación del modelo.

En este sentido, el usuario debe saber con seguridad si los datos con que cuenta son adecuados para su aplicación. Conceptualmente, modelar la superficie de un predio de 5 hectáreas, es igual a modelar la superficie de una región de 3.000.000 de hectáreas, sin embargo, ante la imposibilidad de manejar un número infinito de puntos, en el primer caso será necesario medir variaciones de pocos centímetros y en el segundo caso, bastará detectar variaciones de decenas de metros.

La forma normal de expresar esta necesidad es a través del concepto de escala, concepto que involucra por una parte el detalle espacial de la información temática (unidad mínima de cartografía) y por otra, la precisión del dato planimétrico (x,y) y altimétrico (z). De esta forma, el levantamiento del predio se hará a escala 1:500 y el levantamiento de la región a

escala 1:50.000. Por lo tanto se entiende que, en el levantamiento topográfico del predio, las alturas medidas representan como mínimo variaciones entre 0.25 y 0.5 metros y en el levantamiento de la región, las alturas representan variaciones como mínimo entre 25 y 50 metros, con un 90% de fiabilidad.

Otro factor importante de conocer, es el origen del dato o forma de obtención. Esta puede ser mediante levantamientos topográficos tradicionales (perfiles o redes regulares de puntos), mediante métodos fotogramétricos tradicionales o mediante fotogrametría digital, imagenmetría digital, radargrametría o interferometría. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, pero analizados desde el punto de vista del modelamiento continuo de la superficie a estudiar, los métodos tradicionales requieren de una u otra forma, la interpolación de los datos de altura.

El 90% de los usuarios de SIG obtienen la información de altura a partir de curvas de nivel y cotas digitalizadas de una carta topográfica (fotogrametría tradicional). Con éste método, la superficie real (continua) se transformó en información discreta, representada por la equidistancia entre curvas de nivel y a partir de esta información discreta, el usuario debe reconstruir el manto de la Tierra, como superficie continua. En el primer paso, de la superficie real a su representación por curvas de nivel, se pierde información. Cuanto se pierde depende de la equidistancia entre curvas. Por ejemplo, a escala 1:50.000, la equidistancia mínima entre curvas de nivel es de 25 metros, es decir si entre un par de curvas existe un cerro o una depresión de 10 metros, ésta no estará representada en la información.

El segundo paso, que realiza un usuario de SIG, es a partir de las curvas de nivel interpolar las alturas del terreno que quedan entre ellas. Esta interpolación es en realidad un invento y como dato inventado muchas veces está muy lejos de la realidad, sobre todo en topografías

complejas. Los diferentes métodos de interpolación son intentos de que este invento se asemeje lo más posible a la realidad pero, en la práctica, lo único que se mejora es el aspecto visual no la información. La Figura1, representa los pasos y resultados que se obtienen a partir de a) curvas de nivel y b) curvas de nivel más cotas.

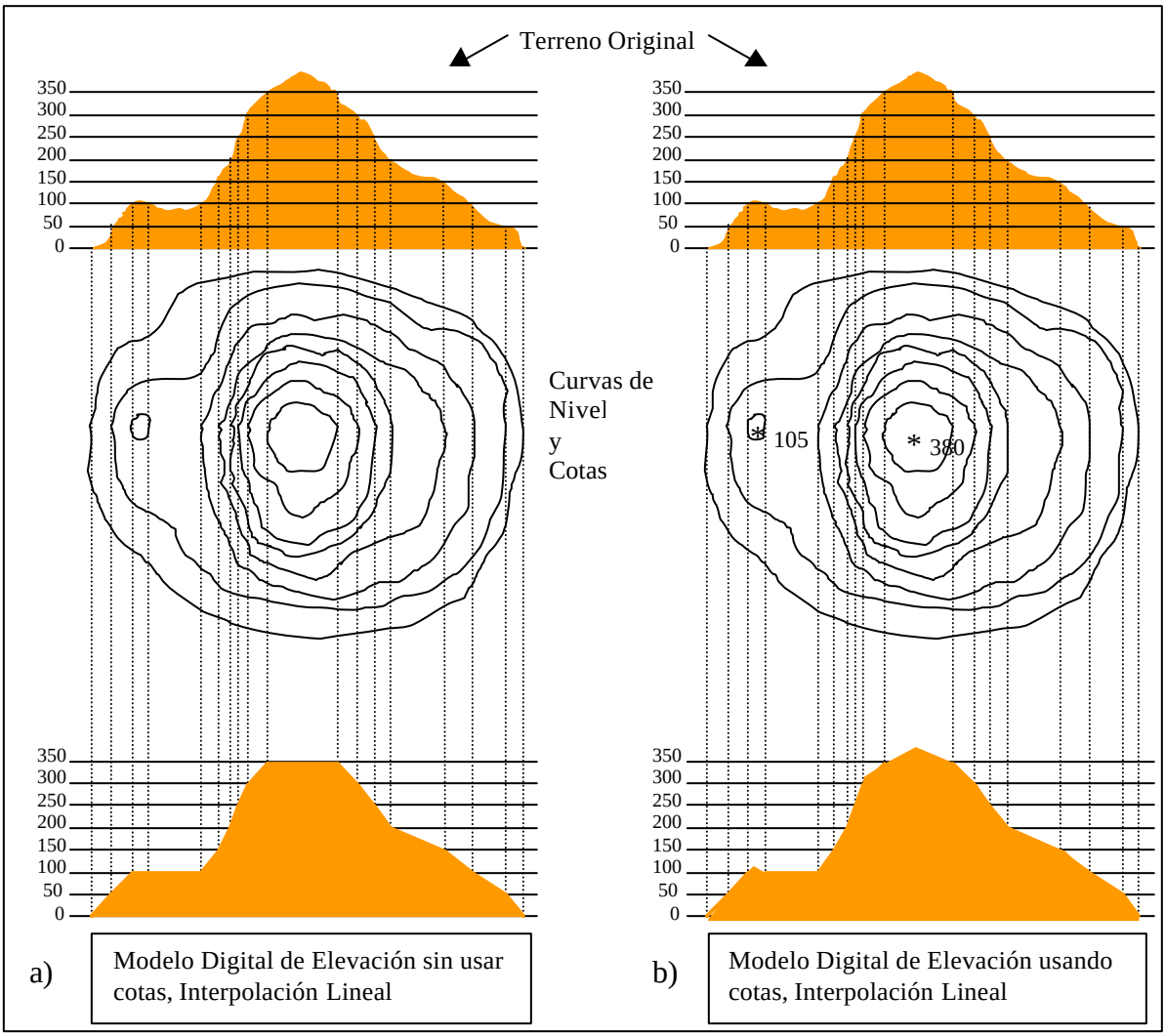

Figura 1: Efecto de generalización de la realidad al utilizar curvas de nivel.

Al usar interpolación no lineal, el aspecto del modelo se suaviza, sin embargo, se crean depresiones o elevaciones artificiales cuando los cambios de pendientes son muy marcados.

2.- Planteamiento del Problema.

Lo que se ha planteado en la introducción es la realidad para todos los modelos hechos a partir de curvas de nivel y cotas sin embargo, el detalle, dado por la equidistancia entre curvas - escala, no es el problema ya que el usuario conoce esta generalización y ella es suficientemente buena para los objetivos de su proyecto. No es el fin de esta presentación, discutir que sucede cuando un usuario no entiende estos conceptos y trata de usar información generalizada en estudios que requieren mayor detalle y peor aún, cuando este usuario quiere generar curvas de nivel con una equidistancia de 1 metro, partir de un modelo hecho con curvas equidistantes en 25 metros.

El problema que se plantea aquí, tiene relación con los errores de interpolación que se producen por **falta de información** y que son independientes del método de interpolación utilizado. Estos problemas realmente son serios ya que, si además de la generalización de la información, agregamos lagos inclinados o cuerpos de agua con pendientes en su interior, ríos que suben y bajan cerros o recorren largos trechos en zonas planas y divisorias de aguas transformadas en extensas mesetas, toda la información derivada de estos modelos inducirán a errores que pueden llegar a ser extremadamente importantes.

Lo grave es que estos errores no se aprecian durante la visualización de un modelo y un modelo malo se ve tan bonito e impresionante como se ve también un modelo bien hecho.

La Figura 2-a, presenta la visualización de un modelo mediante niveles de grises y la Figura 2-b, mediante el método de sombreado, simulando una iluminación Solar con acimut de 50°

y elevación de 45°y la Figura 2-c, el modelo de una zona costera. A pesar de lo extraordinario de esta representación, estos modelos están pésimos ya que contienen una serie de errores importantes que el usuario no alcanza a percibir.

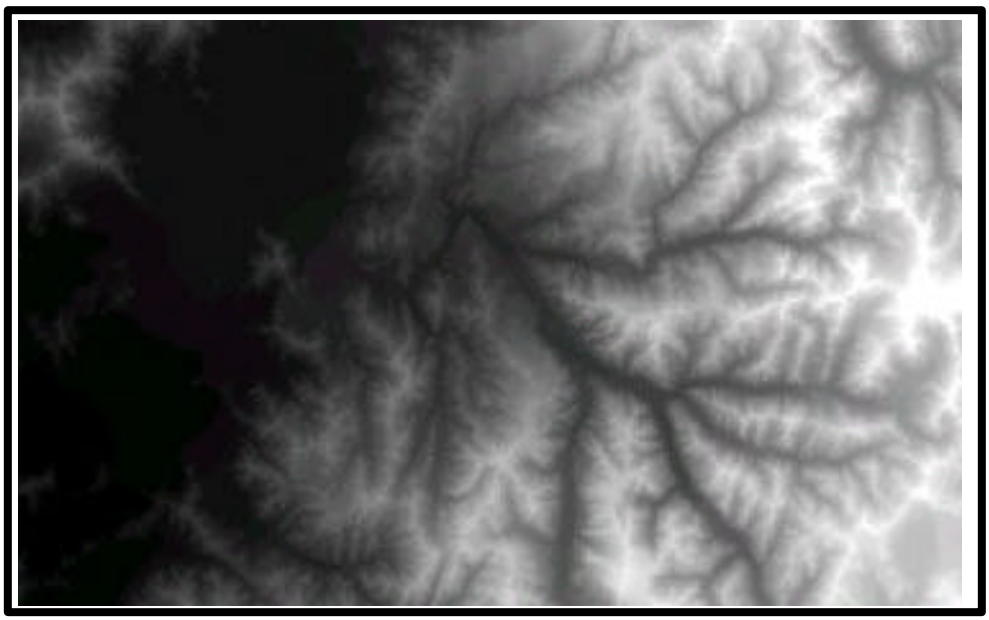

Figura 2-a: Modelo Digital de Elevación, visualización en niveles de grises

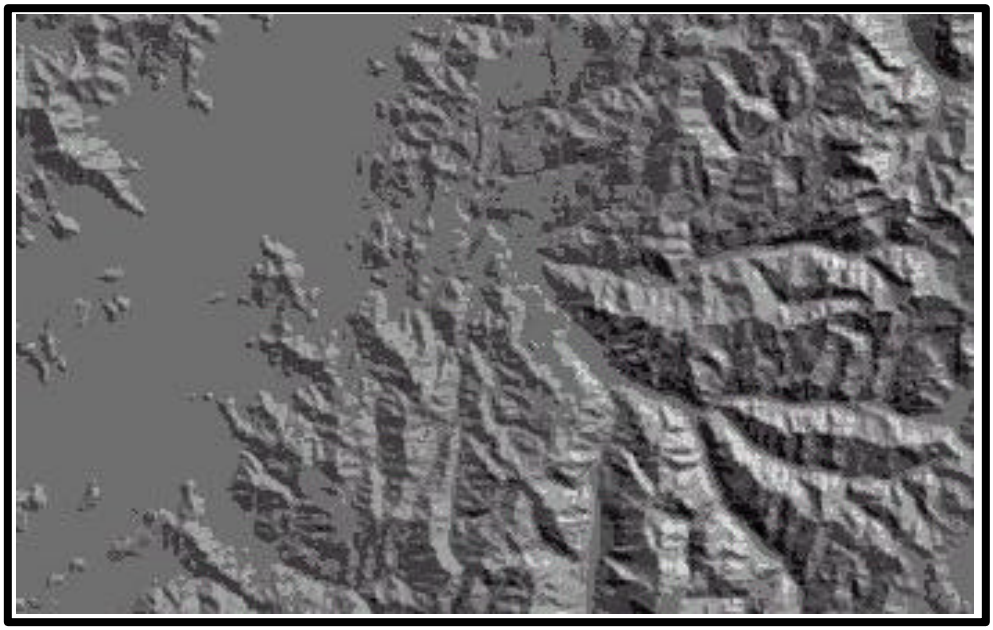

Figura 2-b: Modelo Digital de elevación simulando iluminación Solar de 50° de acimut y 45 ° de elevación.

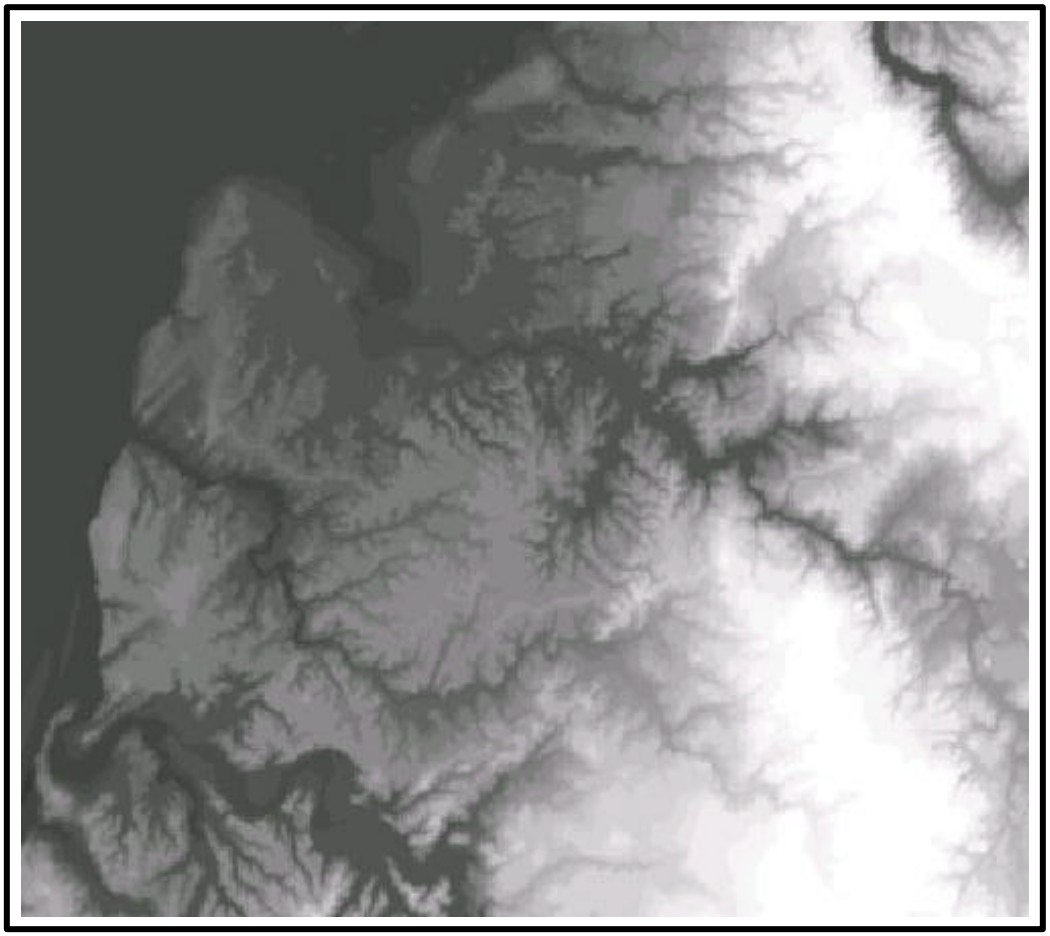

Figura 2-c: Modelo Digital de Elevación, Desembocadura Estero Yali, V Región, Chile.

La Figura 3, muestra los errores de interpolación, presentes en los modelos anteriores y que se producen única y exclusivamente por falta de información.

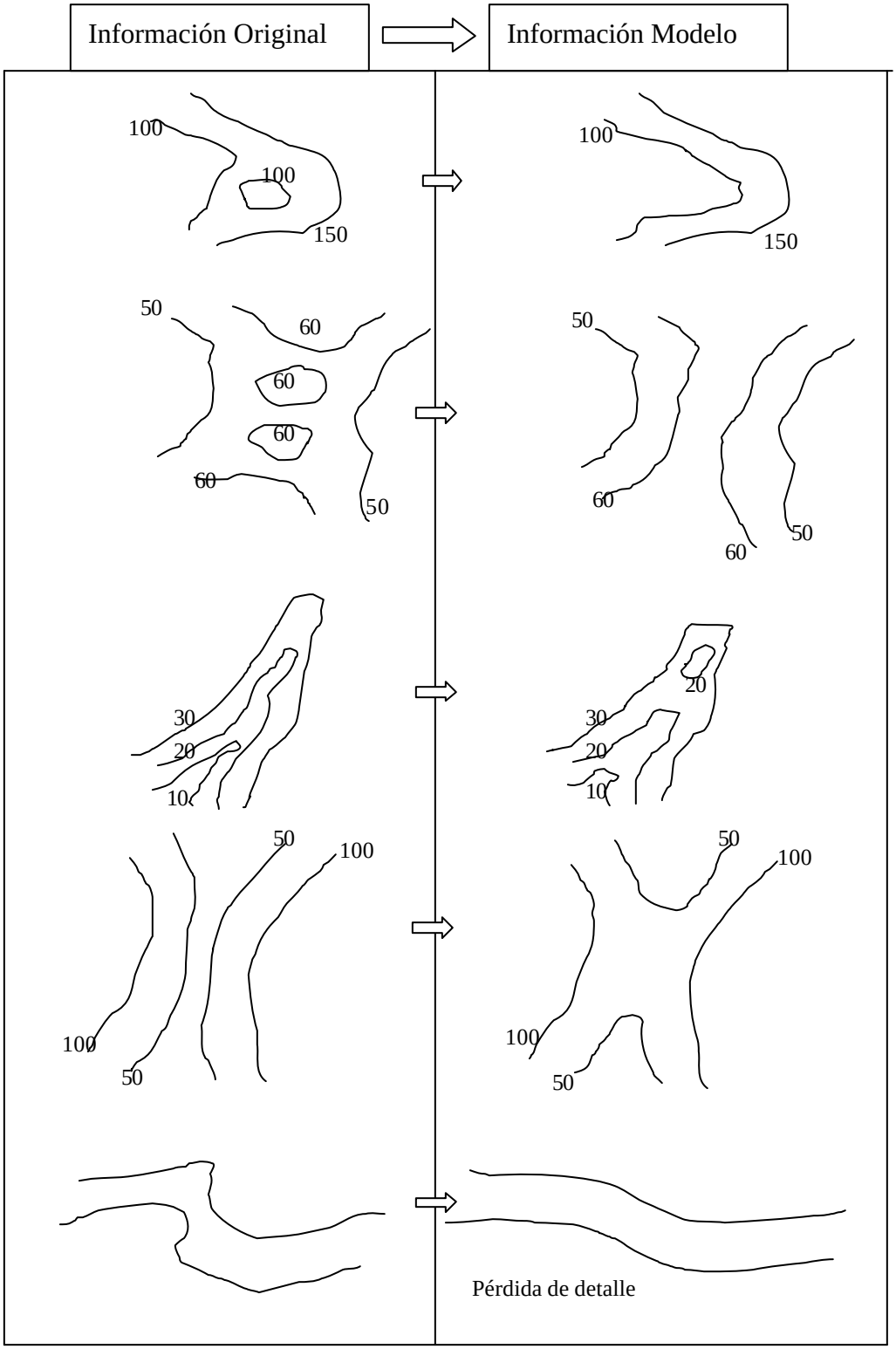

Figura 3: Errores de Interpolación por falta de información

Otra forma de analizar los errores por falta de información, es a través de perfiles longitudinales y transversales. Estos perfiles muestran el error que se produce en el cálculo de pendientes del terreno. La Figura 4, son ejemplos mostrando como la falta de datos produce cambios en el perfil del terreno y por lo tanto, en las pendientes y exposiciones de laderas.

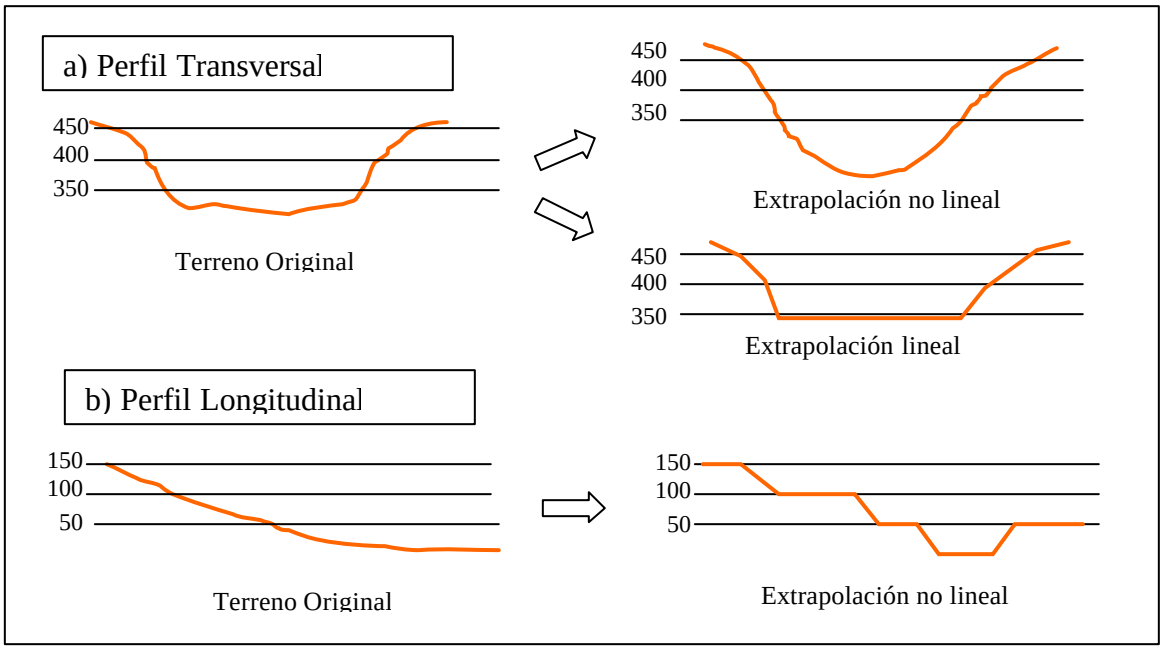

Figura 4: Error en perfiles por falta de datos

Como se ha explicado, la información que se obtiene de curvas de nivel y cotas, no es suficiente para modelar la superficie de la Tierra. Se entiende también que al decir no suficiente, no se está hablando del detalle (escala) de la información sino que se está hablando de información que está implícita en las curvas de nivel pero que ningún interpolador es capaz de manejarla bien.

La idea es entonces hacer explícita esta información, agregando elementos que aporten las cotas que faltan. Estos elementos son:

a) Cuerpos de agua (lagos, lagunas, etc.)

b) Drenaje (ríos, esteros, quebradas, etc.)

c) Divisorias de Agua

d) Acantilados o barreras físicas de importancia

Además de estos elementos, es necesario agregar cotas adicionales en lugares del terreno como los portezuelos, que son zonas donde el interpolador siempre cometerá un error.

3.- Soluciones Propuestas

El problema planteado es un tema que ha sido abordado por algunos SIG, los cuales entregan métodos para incorporar la presencia de barreras, la posibilidad de agregar los drenes y cuerpos de agua, indicando como el software debe tratar a estos elementos es decir, se puede indicar si es un elemento duro (la interpolación no puede pasar de un lado a otro) o si es un elemento blando (la interpolación pasa, pero el dato es límite fijo).

La pregunta que surge inmediatamente es ¿cómo se agrega la altura a un drenaje, si este es una línea?. La respuesta es simple, la altura se agrega a los vértices, no a la línea. La segunda pregunta es ¿de donde se sacan estas alturas?. Aquí la respuesta no es tan simple porque a pesar de que se intuye que debe ser de la información de curvas de nivel y cotas, casi ningún software de SIG tiene esta herramienta implementada. Arc-Info, por ejemplo, utiliza un primer MDE para tomar la altura que tendrá cada vértice de la línea que forma el drenaje pero ¿qué alturas utiliza, si este MDE se sabe que está malo? y ¿cómo ponemos alturas a otros elementos (divisorias de aguas, etc.) que no aparecen en la cartografía?.

La única solución a estos problemas es dibujando los elementos adicionales que faltan e interpolarles su altura en cada vértice.

Hacer esto a mano es tan tedioso y largo que en la práctica nadie lo hace, sin embargo, gracias al manejo de objetos 3D en Arc-View, esto se puede ahora hacer computacionalmente.

En el Centro de Percepción Remota y SIG, se ha programado en Avenue, el lenguaje de programación de Arc-View, un conjunto de herramientas que facilitan y posibilitan hacer esta labor de manera rápida y eficiente.

Las herramientas desarrolladas, cuyo panel de control se muestra en la Figura 5, son las siguientes:

a) Transformación automática de la cobertura de drenajes en líneas 3D, en que cada vértice de las líneas tiene interpolada su altura a partir de las curvas de nivel que son límites en el tramo analizado.
b) Trazar nuevas líneas de drenajes o divisorias de agua y transformarlas inmediatamente a líneas 3D.
c) Trazar una línea entre una cota y una curva de nivel, calcular la altura de sus vértices y generar una línea 3D.
d) Transformación de una línea 3D en puntos simples donde la altura queda guardada en la base de datos
e) Transformación de las curvas de nivel (líneas 2D) a puntos (vértices de la línea).
f) Dibujo de una curva de nivel
g) Dibujo de una línea con cota de inicio y término diferente
h) Dibujo de un acantilado, o líneas 3D paralelas separadas en una cierta distancia.

Este conjunto de herramientas permite agregar la información faltante de un modo muy simple, sólo basta con dibujar la línea que se desea incluir y el programa calcula las cotas de los vértices, interpolando entre curvas de nivel o entre una curva de nivel y una cota determinada.

A continuación se muestra, mediante un ejemplo tomado de una zona considerada difícil de modelar, los efectos que produce el mejoramiento de la información topográfica mediante la adición de información de alturas.

La Figura 6-a, es el mapa de curvas de nivel del área de estudio y las figuras 6-b y 6-c es el MDE generado por interpolación lineal sin tomar en cuentas las cotas y tomándolas en cuenta respectivamente, desplegados con el método de sombrado con una iluminación solar de 50° de acimut y 45° de elevación.

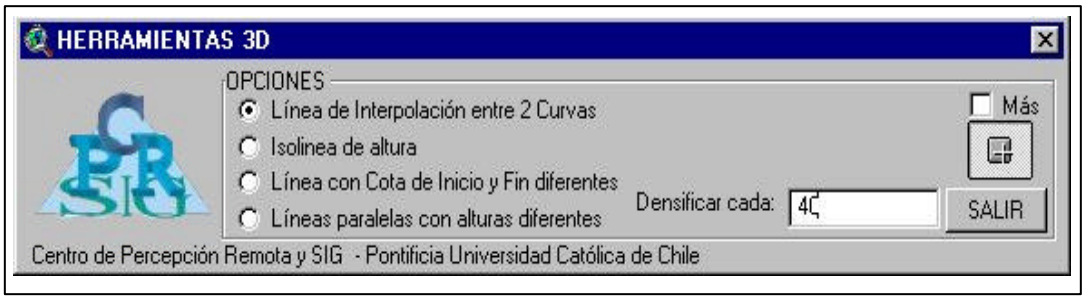

Figura 5: Panel de control de herramientas 3D

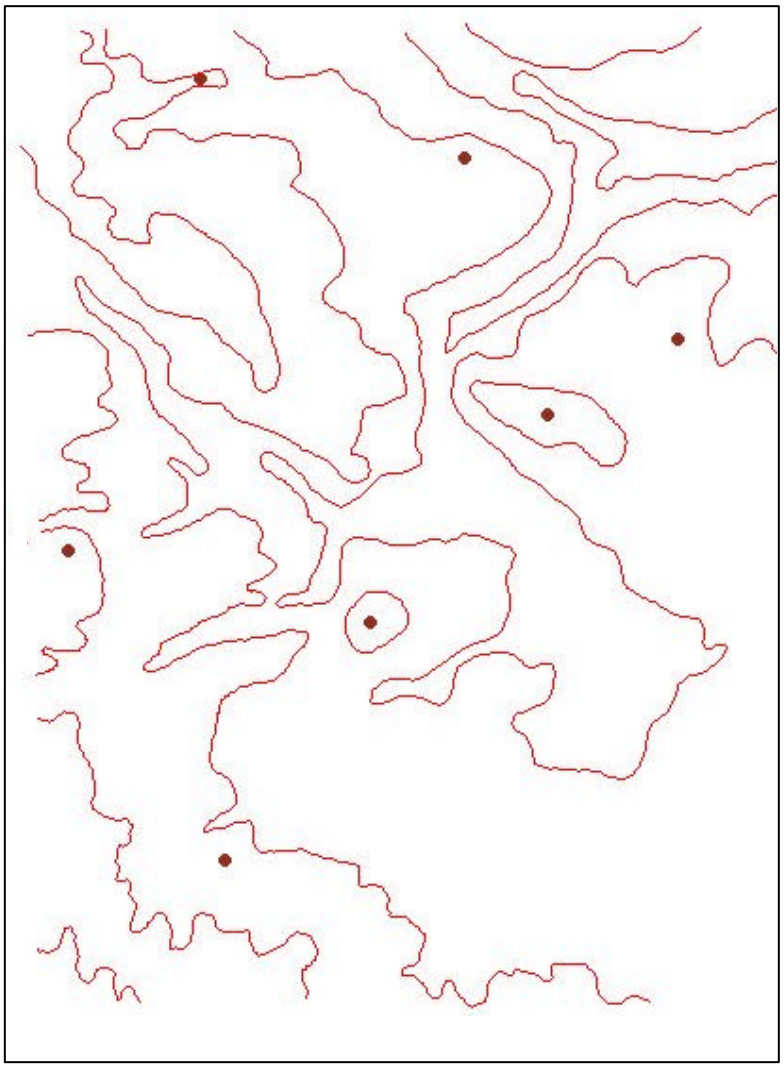

Figura 6-a: Curvas de Nivel Originales

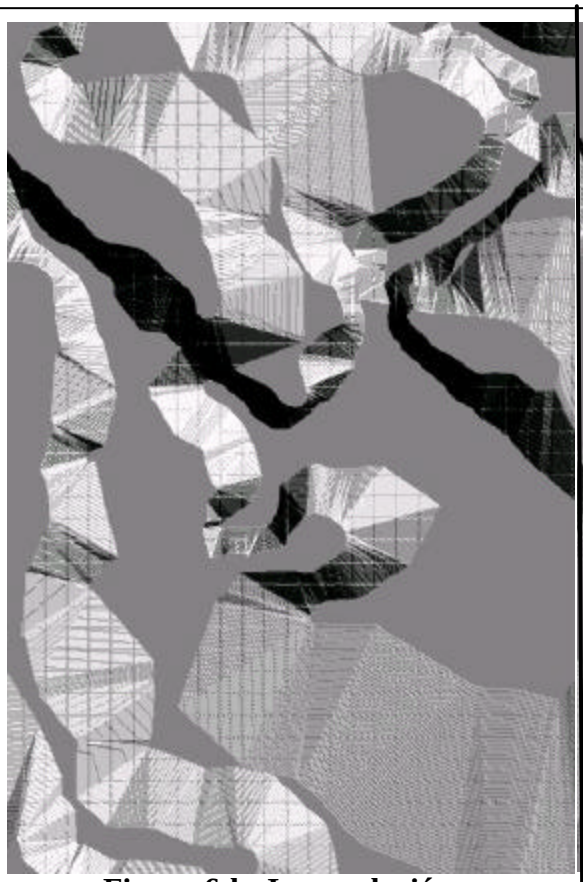

Figura 6-b: Interpolación lineal sin cotas

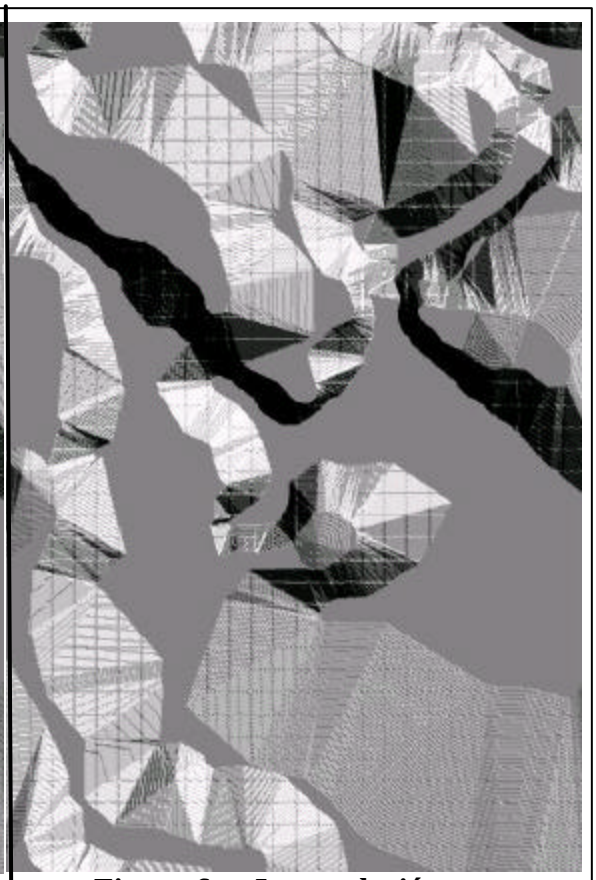

Figura 6-c: Interpolación lineal con cotas

El resultado es el que se esperaba, sin embargo si el despliegue se hubiese hecho en niveles de grises, no se habrían visto estos efectos tan claramente.

La Figura 7-a, muestra el resultado de la curvas de nivel derivadas del MDE interpolado linealmente. Claramente la coincidencia de la información deja mucho que desear y las curvas derivadas muestran claramente la incapacidad de los métodos de interpolación para representar bien las quebradas y portezuelos del área de estudio.

La Figura 7-b, muestra el resultado de hacer un MDE con una interpolación no lineal donde se destaca muy bien la formación de depresiones artificiales, típico de un método no lineal

con falta de información. A pesar de que existen diferencias notables entre los métodos de interpolación no lineal que se pueden utilizar, el resultado será conceptualmente el mismo, es decir, un modelo que no sirve para trabajar seriamente.

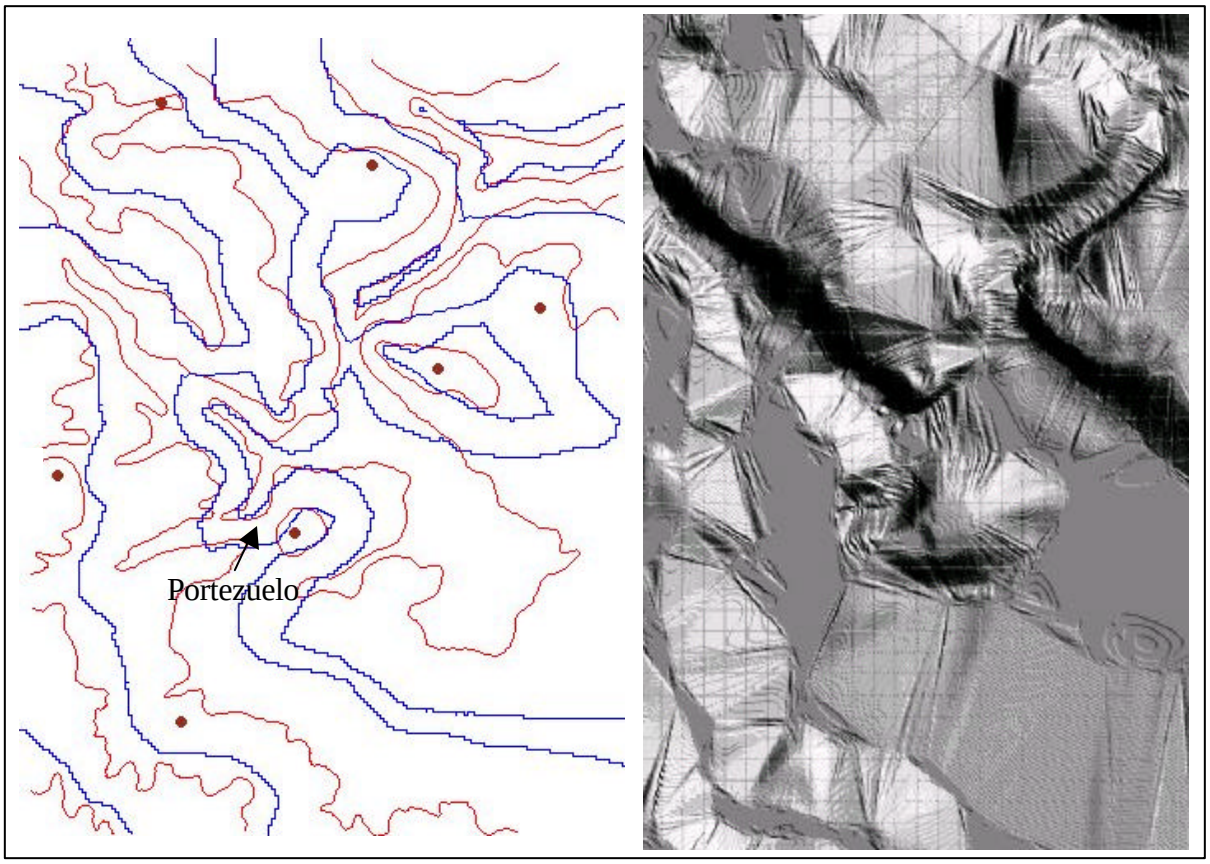

Figura 7-a: En azul, curvas de nivel derivadas del MDE lineal

Figura 7-b: MDE generado con interpolación no lineal.

Los pasos a seguir en el mejoramiento de la información, son los siguientes:

a) Transformar la red de drenajes en líneas 3D

b) Completar la red de drenajes donde la transformación automática no tuvo información para interpolar. Estos casos se producen cuando el dren no alcanza a tocar una curva de nivel y cuando el dren no es continuo, es decir está cortado por uno o más afluentes en el tramo entre dos curvas de nivel.

c) Asignar una cota a los cuerpos de agua y juntarlos con las curvas de nivel.

d) Dibujar el resto del drenaje que no aparece en la cartografía y las divisorias de aguas

Dependiendo del software a utilizar, toda la información será convertida a puntos con las alturas en un ítem de la base de datos (curvas de nivel y líneas 3D) o se convertirán sólo las líneas 3D.

La Figura 8, muestra los datos mejorados, mediante líneas 3D que permitirán al método de interpolación resolver bien todas las situaciones.

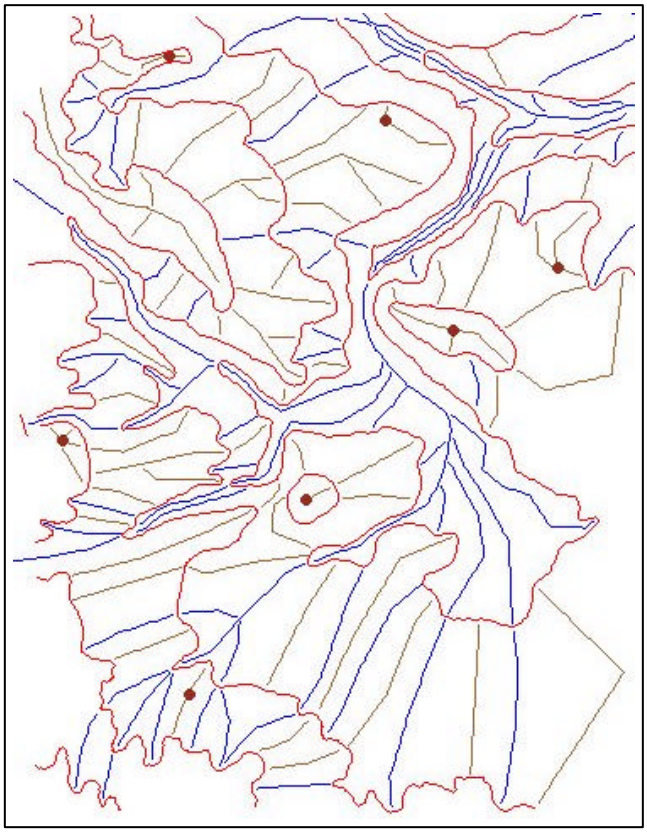

Figura 8: Líneas 3D para mejorar la interpolación

Como se puede apreciar de la Figura 8, lo que se ha hecho es una interpretación visual de las formas del relieve. Con el fin de evitar interpretaciones subjetivas, lo ideal es contar con una ortofoto y/o una imagen satelital ortogeorreferenciada que, utilizada como fondo, ayude a trazar estas líneas por los lugares correctos.

Una decisión importante que se debe hacer, cuando el MDE se generará en formato de retícula, es el espaciamiento entre los puntos (equivalente al tamaño de la celda). Usar una separación muy pequeña genera un volumen de datos extremadamente grande y no significa mejor información, al contrario, los efectos de falta de información y artificios del método de extrapolación, serán más notorios. Al contrario, una separación muy grande, generalizará mucho los valores de altura y se perderán muchos detalles. Por experiencia, se recomienda usar una separación de 1/1000 del factor de escala, es decir 1 mm de separación. El límite para una separación más pequeña es de 1/2000 del factor de escala, es decir, 0,5 mm. Por ejemplo, si nuestra información está a escala 1:50.000, la separación normal a utilizar será de 50 metros y como mínimo 25 metros.

La Figura 9 muestra una imagen Landsat en falso color convencional, utilizada como fondo de imagen. Se aprecia claramente las formas del terreno y la calidad de la interpretación hecha sobre las curvas de nivel. Existen lugares donde se debe corregir la interpretación y otros donde claramente la falta de información está relacionada con el nivel de detalle o equidistancia entre curvas, en este último caso, no se podrá mejorar la información.

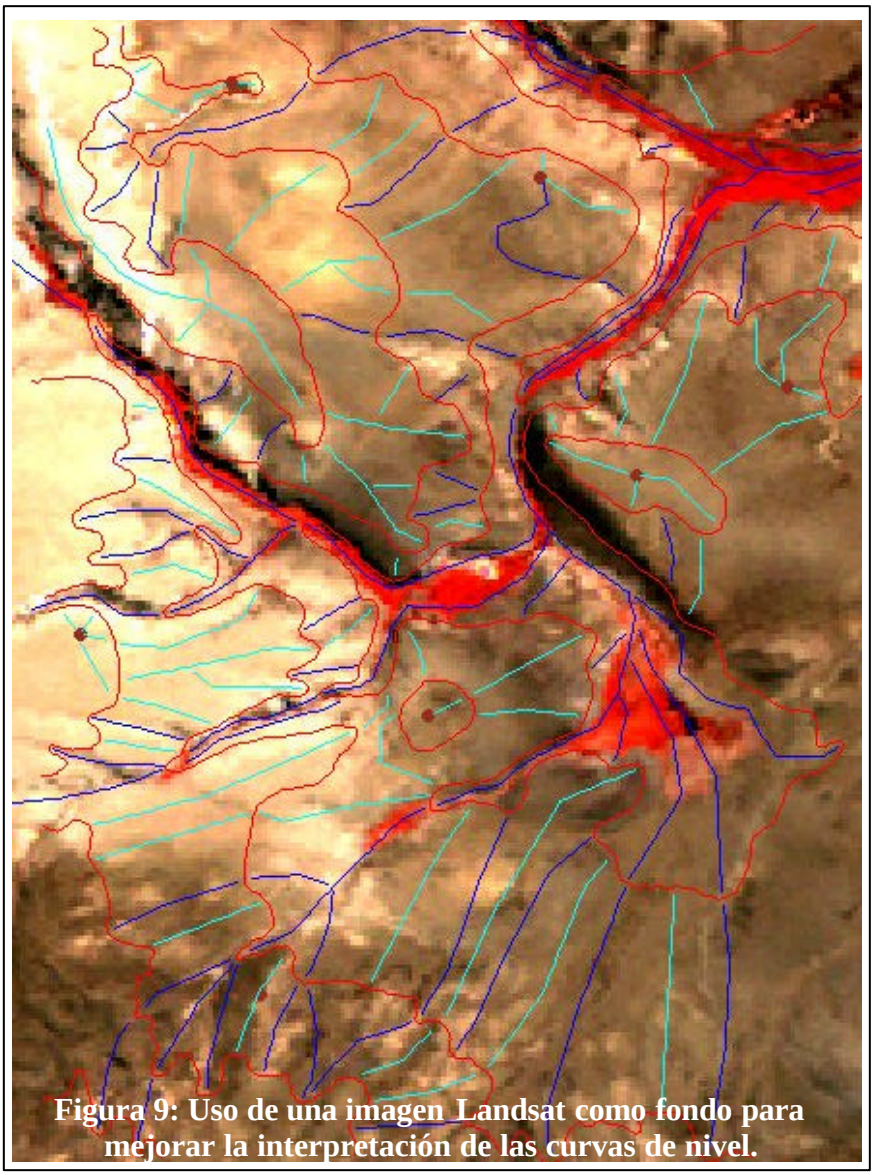

Figura 9: Uso de una imagen Landsat como fondo para mejorar la interpretación de las curvas de nivel.

Terminada la etapa de preparación de la información, se procede a generar el nuevo Modelo Digital de Elevación, seleccionando el método que mejor represente la superficie a modelar. Las diferencias ahora no serán tan notables y el usuario tendrá que evaluar la calidad de los productos derivados (pendientes y exposición) para decidir con que modelo se queda finalmente. La Figura 10 muestra los resultados obtenidos mediante interpolación lineal y no lineal y una separación de 30m. En ambos casos, se comparan estos resultados con los productos iniciales.

La Figura 11, muestra el efecto de mejorar los datos al obtener el mapa de pendientes.

Figura 10-a: Interpolación lineal sin datos adicionales

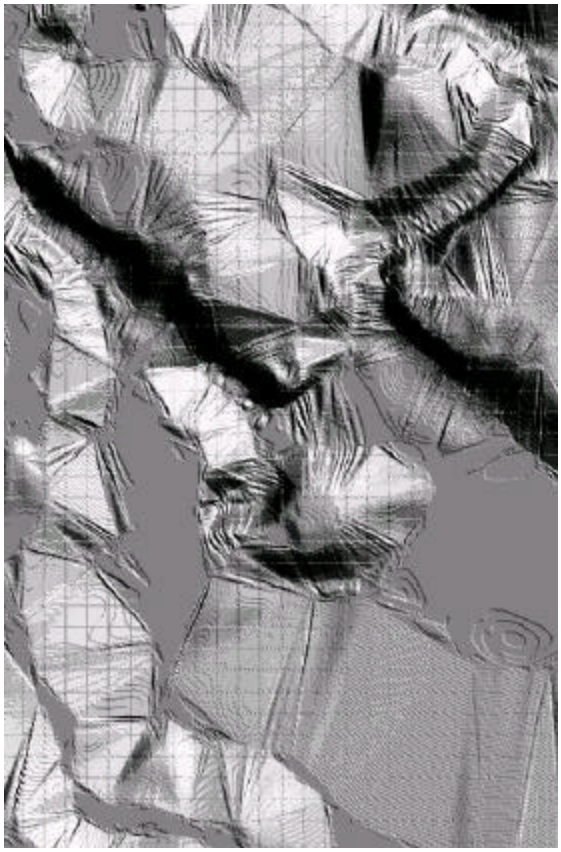

Figura 10-b: Interpolación no lineal sin datos adicionales

Figura 10-c: Interpolación lineal con datos meiorados.

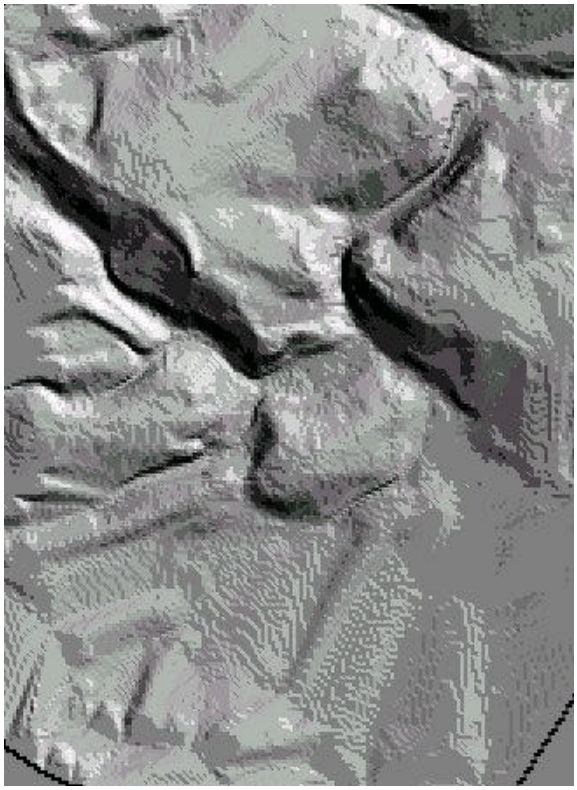

Figura 10-d: Interpolación no lineal con datos meiorados.

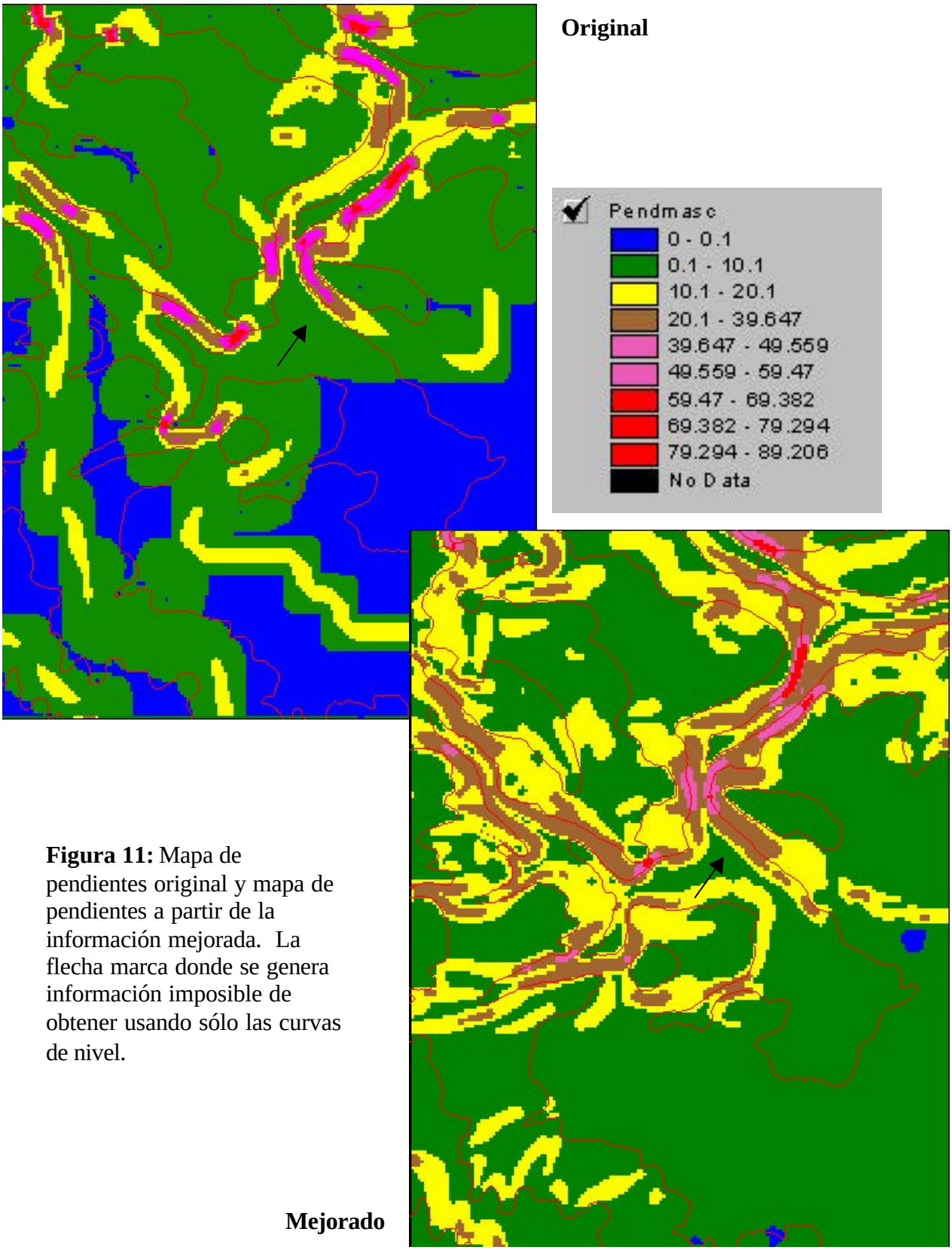

Figura 11: Mapa de pendientes original y mapa de pendientes a partir de la información mejorada. La flecha marca donde se genera información imposible de obtener usando sólo las curvas de nivel.

4. Conclusiones

Ha quedado demostrado que para hacer un modelo digital de elevación (MDE), que realmente represente la superficie del territorio a modelar, es necesario introducir información adicional de alturas y que esta información debe provenir de datos interpolados adecuadamente, es decir, bien pensados.

Esta tarea se simplifica mucho mediante herramientas diseñadas para generar capas adicionales de información en tres dimensiones, provenientes inicialmente de la red de drenajes y completada a mano con información de drenaje y de divisorias de aguas interpretada a partir de las curvas de nivel y agregando además, líneas especiales que permitan representar bien características topográficas especiales del terreno como son los portezuelos.

No hacer este mejoramiento de los datos implica generar errores importantes en el cálculo de pendientes y en todo el resto de información en la cual ésta variable es la base fundamental de cálculo, por ejemplo, en modelos de radiación solar, modelos de erosión potencial, modelo de crecimiento de biomasa, por nombrar sólo algunos.

5. Bibliografía

1.- **Burrough P. A.**, "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment, Oxford, 1986.

2.- **Aronoff Stan**, "Geographic Infornation System: a Management Perspective", 1989.

3.- **Demers Michael**, "Fundamentals of Geographic Information Systems", Second Edition, 2000

4.- **Erdas Imagine** 8.3

5.- **Manual de Avenue**, Arc-View 3.2