

Pasado y Futuro de los Modelos Digitales del Terreno: Mallas Regulares y Formato Híbrido

Contenido

1	Adquisición y Procesamiento de datos	4
2	Formato híbrido de Modelo Digital de Elevaciones	5
3	Aspectos de calidad.....	6
4	Filtrado	7
5	Otros aspectos a considerar.....	9
	• Aproximación no lineal.....	9
	• Reducción de datos	10
	• Almacenamiento de datos y consumo de tiempo.....	10
	• Mirando hacia el futuro.....	10
	• Modelado en 3D de ciudades	11
	• Integración dentro de SIG.....	11

Introducción

La revista GEOInformatics publicó en su número de Julio de 2003 un artículo a favor del formato TIN (Red de Triángulos Irregulares o Triangular Irregular Network) para la generación de Modelos Digitales de Terreno. A continuación este artículo es cuestionado ya que este no hace justicia a otros métodos basados en mallas regulares de puntos. Los autores presentarán su punto de vista opuesto.

Las líneas siguientes son una traducción realizada por GTBIbérica del artículo *“Looking back and ahead: Grid Based Digital Terrain Models”* escrito por los profesores Friedrich Ackermann and Karl Kraus.

Nos referimos al artículo *“Looking back and ahead: The Triangulated irregular network (TIN)”* de Jeff Thurston (GEOInformatics 7/2003 p. 32-35). En el artículo algunos de los autores y desarrolladores del formato TIN expresaron sus aún sostenidos argumentos a favor de los métodos TIN en contra de los métodos basados en mallas regulares para la representación de superficies de terreno. Sus argumentos evidentemente se refieren sin declararlo explícitamente, a ciertas condiciones de adquisición de datos. Además se hace una evaluación bastante negativa de los formatos de mallas regulares que no refleja la verdadera potencia de estos métodos y por tanto nos vemos en la obligación de cuestionarlo.

Thurston esencialmente anota las siguientes argumentaciones como propiedades del TIN:

- El TIN requiere menos espacio de almacenamiento para la representación de MDT que los métodos de mallas regulares
- El TIN es generalmente más eficiente que el de mallas regulares (“los cuales parecen muy ineficientes”)
- El TIN está hecho para terrenos irregulares que no pueden ser bien representados por mallas regulares, porque “las cuadrículas dividen el terreno en unidades de igual dimensión”.
- El TIN es adaptable a estructuras topográficas de variada complejidad ya que la distribución y densidad de los puntos originales implícitamente reflejan las irregularidades de la superficie del terreno. (Ver figura 1 en el documento de Thorston).

Esta lista es altamente cuestionable.

Se refiere a una filosofía particular de adquisición y procesamiento de datos. En contra de estas afirmaciones debemos aportar una serie de consideraciones perfectamente válidas a favor de los métodos basados en cuadrículas.

1 Adquisición y Procesamiento de datos

Existe una diferencia básica entre la adquisición de datos y su procesamiento.

Hoy en día, con la potencia y rapidez de cálculo que disponemos, esto es particularmente cierto ya que antiguas restricciones en las observaciones para facilitar y mejorar el cálculo, pueden evitarse. En este sentido, no deberíamos condicionar la toma o adquisición de datos al modelo matemático o a la descripción geométrica del terreno.

Por ejemplo, el formato TIN puede ser muy adecuado y eficiente para ciertas aplicaciones pero la ausencia de generalidad y de redundancia de datos es evidente.

Está claro, que a la hora de modelar la superficie es necesario adquirir una serie de puntos o medidas que nos definan el terreno, así como relaciones topológicas tales como líneas estructurales o puntos singulares. Dentro de los sistemas de adquisición de datos existen dos filosofías completamente opuestas.

En el primer caso el terreno se define eligiendo un número mínimo de puntos situados estratégicamente en zonas definitorias de la superficie. Esta condición exige por tanto una elección interactiva e inteligente de los puntos a considerar o medir y por tanto va en detrimento del automatismo.

Este principio era muy adecuado en el pasado, cuando el coste por cada punto medido era muy alto (planos taquimétricos).

El formato TIN se adapta perfectamente a este número de puntos medidos mínimo y se desarrolló en ese contexto, es decir, adaptado a la toma de datos para la realización de planos taquimétricos. En este caso particular, el formato TIN es muy adecuado y eficiente aunque es evidente que el DEM final depende enteramente de la calidad de estos datos y el resultado es difícilmente chequeable debido a la falta de redundancia de datos.

La filosofía opuesta está orientada hacia los grandes y muy grandes conjuntos de datos, como los (cada vez más) proporcionados por las técnicas automáticas de medición, y en concreto por escaners laser (LIDAR) así como por procesos automáticos de correlación de imágenes digitales. Siendo el coste por punto totalmente insignificante, el resultado es una densa cobertura del terreno por puntos y una alta redundancia, mientras que la distribución de los puntos puede ser aleatoria o casi-regular y sin estar condicionada esta distribución por la forma general del terreno.

La interacción necesaria para establecer la distribución óptima en el caso de la anterior filosofía puede ser costosa y no siempre disponible. Hoy en día esa técnica puede reemplazarse debido a la sofisticación inteligente del software de procesamiento de datos. En este contexto aparece el formato de malla como método mucho más eficiente, basado en una adquisición automática de grandes cantidades de datos, con distribución regular y con una gran redundancia.

En 1970 al comienzo de nuestro desarrollo de MDT, el poder de la captura de datos automático no había sido concebido aún. Pero nosotros ya teníamos en mente en aquel tiempo, la adquisición fotogramétrica semiautomática de grandes conjuntos de datos y escogimos el formato de malla

regular como el mas óptimo y eficiente. Una revisión sobre los varios conceptos de adquisición de datos hasta las consideraciones del software puede encontrarse en Ackerman 1992 y 1994.

2 Formato híbrido de Modelo Digital de Elevaciones

Llegados a este punto, es importante mencionar que uno de los requisitos indispensables para generar DEMs de alta calidad es la introducción de líneas de ruptura o estructurales así como puntos singulares que ayuden a una mejor definición de la superficie. Se asume normalmente que estas líneas son definidas y capturadas interactivamente. El tratamiento de estas líneas por parte de los formatos TIN es bastante sencillo ya que estas líneas constituyen caras de los triángulos. Sin embargo el formato basado en mallas regulares, puede ser diseñado para manejar tanto las características estructurales mencionadas anteriormente así como mallas regulares de diferente densidad. Esta propiedad permite dotar al método de mallas regulares de mas aplicabilidad.

Las líneas de ruptura deben ser modeladas adecuadamente dentro de la malla e intersectadas con las líneas de la cuadrícula, para lo cual se utilizan operaciones como las del TIN.

Esto es lo que nosotros llamamos formato Híbrido de DEM La Figura 1 muestra un ejemplo (el cual sugiere que las mallas regulares parecen dar una mejor percepción visual intuitiva del terreno que los triángulos irregulares).

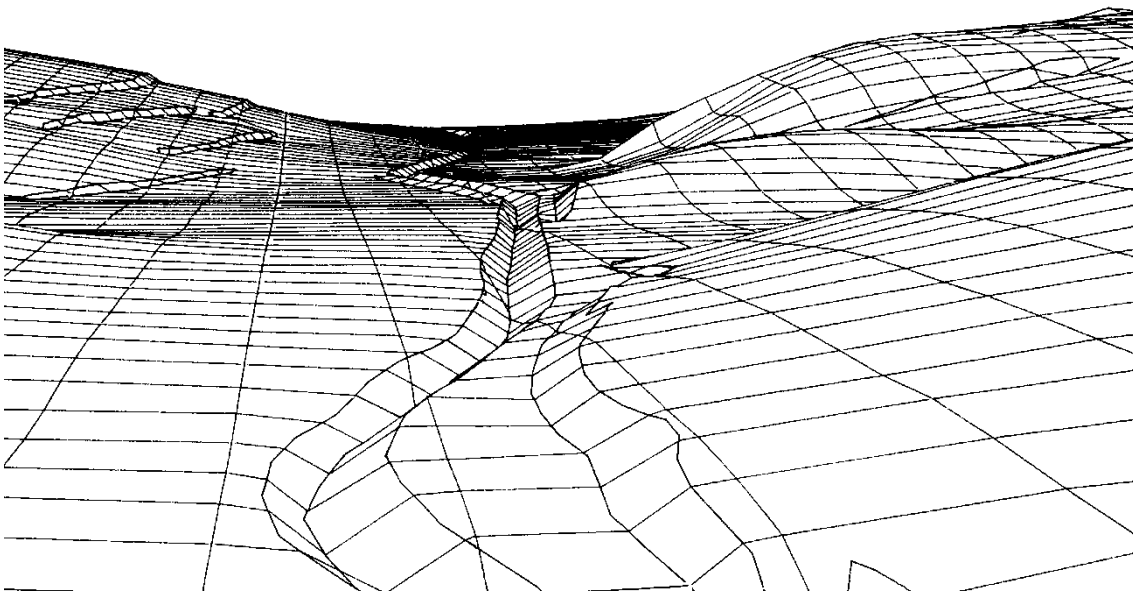
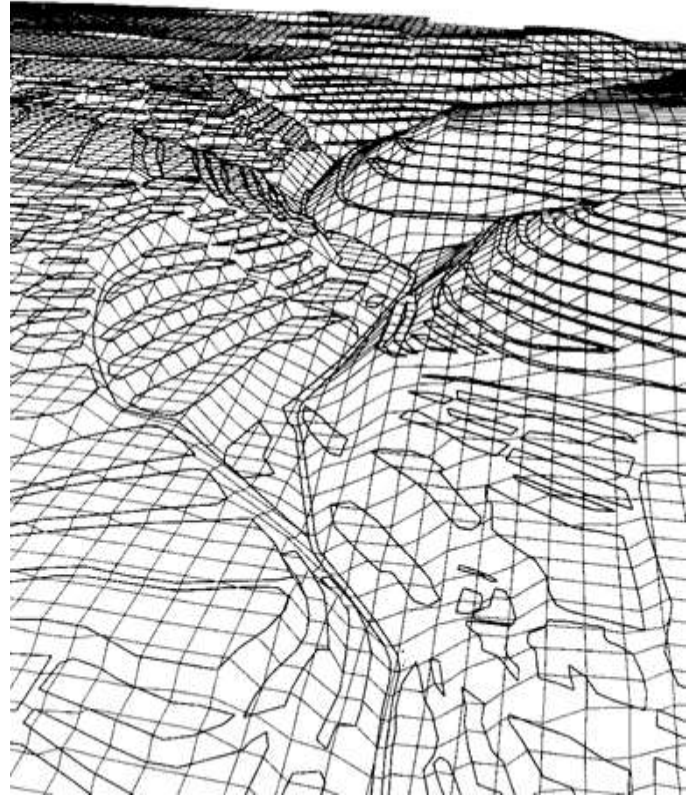


Figura 1.

Los autores han realizado tales desarrollos de DEM híbrido desde 1970, sin embargo algunos casos complejos tuvieron que ser manejados por un software mas sofisticado (véase Köstil y Sigle 1986). Existen casos (en taquimetría) donde hay más puntos de líneas estructurales que puntos de superficie (véase el ejemplo de la figura 2), y muchas líneas estructurales pueden cruzarse con la cuadrícula. El software SCOP++ tiene esto en cuenta.

Como se ha comprobado, la funcionalidad y algunas características del formato TIN no han sido rebatidas. Es evidente, que el método TIN puede ser aplicado en práctica y es particularmente eficiente en ciertas condiciones (mencionadas anteriormente). Sin embargo, no vemos ningún caso que no pueda tratarse con el método de mallas regulares con al menos la misma calidad aunque eso sí, con un software mas sofisticado. Además las mallas regulares proporcionan condiciones más favorables para futuros desarrollos.



3 Aspectos de calidad

Las características decisivas del método de malla regular para nosotros son:

1. Su aplicabilidad general
2. Su capacidad de manejo de grandes cantidades de datos mas de 10^7 a 10^9 puntos obtenidos por técnicas de medición automática
3. La utilización de la gran redundancia de datos para seguridad y control de calidad del DEM, para identificar errores en los datos, para filtrar las observaciones, etc.

Con todo esto, nuestro objetivo es por una parte la producción de grandes DEMs que pueden cubrir estados o países (aparentemente esta opción no es posibles con los TIN) y por otra la generación de DEMs de grandes escalas para aplicaciones dentro de la ingeniería. Nosotros podemos cubrir ambos casos con el mismo software.

El volumen de datos a ser manejado por DEMs ha aumentado de forma prácticamente exponencial en las últimas décadas. Mientras hace 35 años los proyectos de DEM con mediciones taquimétricas de campo comprendía quizás 10^3 puntos, la adquisición de datos por fotogrametría semiautomática proporcionaba ya en aquel tiempo 10^4 o mas por cada par de imágenes. Hoy en día, con la potencia de las técnicas modernas de procesamiento digital de imágenes, hemos llegado hasta 10^7 ó más puntos por par de imágenes y los proyectos de DEM pueden comprender miles de imágenes. El escaner láser aerotransportado (LIDAR) puede alcanzar dimensiones similares.

El método TIN tendría bastantes problemas para tratar estos volúmenes de datos, pero el método de mallas regulares puede manejar estos datos directamente con alta economía en el cálculo porque el tamaño de la malla no está directamente condicionado por la densidad de puntos observados. En caso de alta densidad de puntos, quizás mil veces más puntos que antes, la anchura de malla debe seleccionarse para tener quizás 10 o 20 puntos observados en cada unidad. Tal redundancia puede usarse para valorar la precisión del DEM.

También se puede analizar si el terreno es suficientemente plano y está propiamente representado con las unidades de cuadrícula. En casos de densidades mínimas de puntos, las cuadrículas fueron y son normalmente seleccionadas dos o tres veces más pequeñas que el promedio de distancia entre los puntos. Por tanto, la generación de una malla regular de DEM es claramente asunto de interpolación no lineal entre los puntos. Esto es implícitamente realizado por la función covarianza de la interpolación por mínimos cuadrados que es la herramienta matemática escogida para nuestro planteamiento.

En el caso alta densidad y alta redundancia de datos las cuadrículas están altamente sobredeterminadas y el modelamiento matemático del terreno será consecuentemente un sistema de ajuste sobredeterminado con todas sus ventajas teóricas y prácticas.

4 Filtrado

Los puntos de terreno observados están siempre asociados con más o menos errores aleatorios. Se refieren o a errores directos de observación o a efectos de ruido. Estos errores deberían no formar parte del DEM. Por tanto, los puntos de terreno tienen que ser filtrados en la mayoría de los casos con el objeto de no trasladar los errores aleatorios sobre los DEMs derivados.

No somos conscientes de que el filtrado sea aplicado en los programas de TIN (aunque podría ser posible). Sin embargo, en el formato híbrido de DEM aplicado en el software SCOP de los autores fue utilizado exitosamente el método de interpolación de mínimos cuadrados con el filtrado de los datos (Graus y Mikhail 1972), aplicado desde el comienzo. Este método puede fácilmente acomodar datos y conjuntos de datos de diferente precisión.

Esto también da una valoración teórica de la precisión obtenida en el DEM. Un planteamiento de elementos finitos regulares podría dar resultados similares. Ha sido probado recientemente (Graus 1998) que la interpolación por mínimos cuadrados con filtrado es equivalente a Krigging, un método de interpolación que es bien conocido y muy utilizado en geoestadística.

La parte de filtrado de la interpolación por mínimos cuadrados ha sido recientemente modificada para separar puntos de terreno de puntos fuera del terreno (por ejemplo árboles o edificios) en datos LIDAR. De forma que el resultado del filtrado proporciona un fichero .grd con los puntos del terreno y otro .veg con los puntos de vegetación y edificación.

A grandes rasgos, se define una función de pesos en función de los residuos de cada punto a una superficie interpolada inicial. Este método es el aplicado en el módulo LIDAR de SCOP++ y se está convirtiendo en unos de los métodos más comúnmente aplicados. Las figuras 3 y 4 muestran la superficie del modelo derivado de datos lidar aerotransportado y el correspondiente DEM de malla regular con anchura de 1 metro.

La economía de estos DEMs densos puede incluso mejorarse si las líneas estructurales tridimensionales (breaklines) son modeladas de forma automática a partir de los datos de observación altamente redundantes, en lugar de ser capturados interactivamente. Los primeros resultados experimentales fueron presentados en el Congreso ISPRS en Estambul en Julio de 2004.

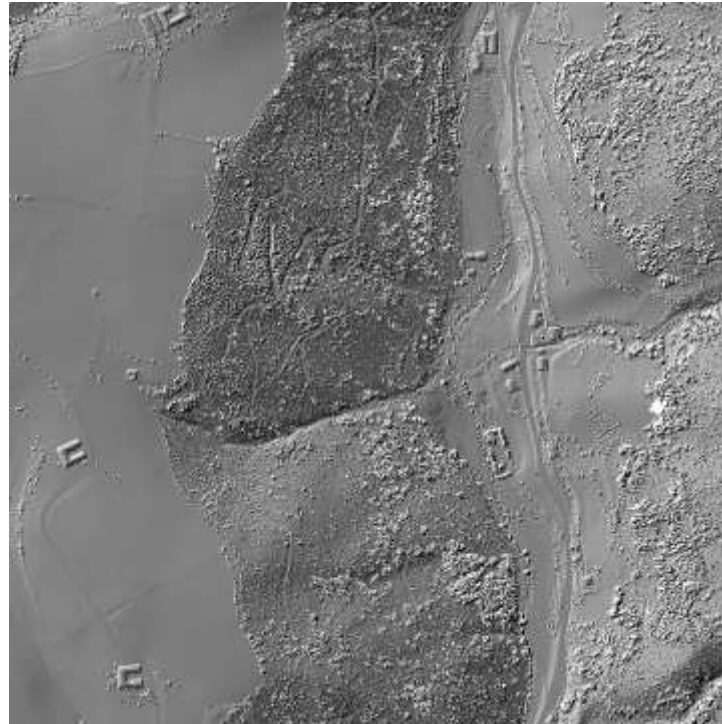


Figura 3.

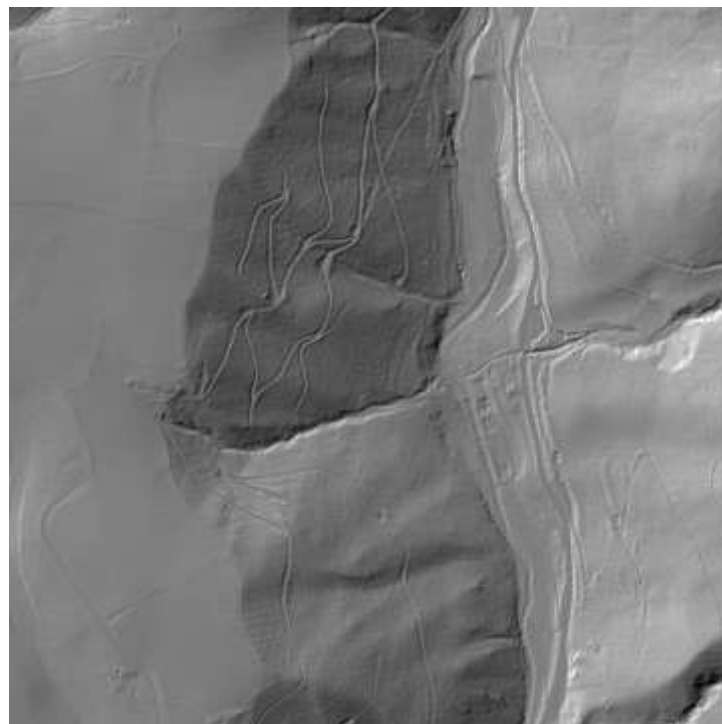


Figura 4.

5 Otros aspectos a considerar

- *Aproximación no lineal*

Existen superficies de terreno que son suavemente curvadas y quedan definidas apropiadamente por tan solo unos pocos puntos. Aquí, los triángulos planos del método TIN no pueden ajustarse para describir las superficies curvadas, a no ser que se aplique una densificación adicional. (la figura 2 de Thurston muestra muchas esquinas y límites que son efectivamente artefactos computacionales y no características genuinas del terreno).

En principio, sería posible diseñar aproximaciones triangulares de mayor grado con al menos continuidades C^1 , pero no conocemos si esto ha sido realizado en aplicaciones de terreno. Por otra parte, la interpolación por mínimos cuadrados debido a su función de covarianza y a su más alto orden de continuidad nos proporciona superficies suavemente curvadas mas directamente, proveyendo intrínsecamente excelente visualización o sombreado. (ver figura 5)

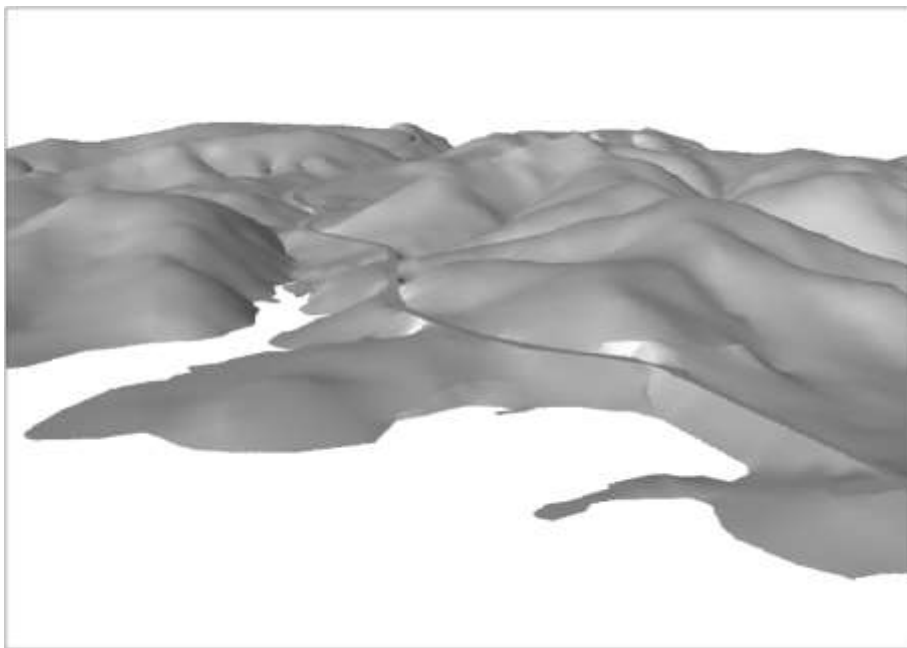


Figura 5.

En líneas estructurales solo se consideran continuidades C^0 , es decir no están impuestas ni pendientes ni continuidades de curvatura.

En el caso opuesto, cuando la superficie del terreno contiene zonas planas, el método TIN tiene la ventaja directa de que pocos puntos o no puntos del todo son necesarios para medir allí. La interpolación de mínimos cuadrados tiene que modificar automáticamente su función de covarianza en tales áreas con el objeto de proveer una interpolación lineal y prevenir que la superficie interpolada se pandee en áreas vacías. Tal modificación ha sido tenida en cuenta en nuestro software SCOP++.

- ***Reducción de datos***

Las técnicas modernas de adquisición de datos proporcionan una abundante cantidad de puntos que debe ser reducida para ser manejada por los sistemas de DEM. El método TIN no utilizaría todos los puntos originales de la triangulación Delaunay. Descartar grandes subconjuntos de datos antes de procesar es posible, pero este es un procedimiento sensible ya que necesita sobretodo inteligencia y precaución. Por otra parte, el método malla regular puede utilizar todas las observaciones originales de una forma económica y controlada para derivar el conjunto reducido de datos. En ese sentido es un método de gran calidad de reducción de datos.

Muchas aplicaciones requieren modelos digitales de terreno en aproximaciones gruesas solamente. Thurston habla del cálculo de capas piramidales con el método TIN para ese propósito. En el MDT de malla regular tales estructuras de pirámides pueden ser igualmente realizadas usando *quadrees*.

En ese caso las curvaturas locales son calculadas en todos los puntos de la malla y los puntos por debajo de un umbral de curvatura son eliminados. De esta forma se mantiene una estructura de DEM de anchura de malla variable, esto puede servir como base para un futuro TIN (ver Kraus 2003), en caso de que sea requerido para futuros desarrollos.

- ***Almacenamiento de datos y consumo de tiempo***

Hoy en día, el potencial de los equipos de cálculo es tal que no merecen la pena discusiones acerca de la capacidad de almacenaje o tiempos de proceso en el contexto de los DEMs. Es indudable que los equipos actuales pueden manejar grandes proyectos.

- ***Mirando hacia el futuro***

Los desarrollos de DEMs han alcanzado un rendimiento muy satisfactorio y debido a ello sus aplicaciones se extienden a diferentes campos. La evaluación comparativa de diferentes métodos y programas de software no ha sido realmente resuelta aún pero eso ya no es un asunto relevante. Sin embargo, lo relativo a futuros desarrollos o a la adaptación a casos especiales y de valoración de calidad merece una atención continuada.

El desarrollo básico de modelamiento digital de terreno sin embargo, no ha sido concluido del todo, este solo ha llegado a un nivel intermedio. Por tanto es urgente un desarrollo adicional que vaya más allá de su actual nivel ejecución, especialmente en modelado de terreno tridimensional y modelado de ciudades, pero también la integración de los DEMs en los SIG. Nosotros estamos de acuerdo con la visión generalizada en el documento de Thurston el cual no es restringido a los métodos TIN. Estos temas están mas lejos del propósito de este documento, pero puede permitirse una visión general breve.

- ***Modelado en 3D de ciudades***

Los modelos digitales de terreno fueron concebidos para describir geoméricamente superficies de terreno. Este concepto es apropiado en terrenos con poca vegetación o superficies áridas. En bosques o en áreas cubiertas de vegetación la adquisición de datos de superficie ha sido un problema.

Esto ha dado lugar a los Modelos Digitales de Terreno usados en la producción de ortofotos. Por otra parte, el filtrado de datos LIDAR o nubes de puntos correladas permite distinguir entre terreno sólido y superficie de vegetación. Sin embargo, el mayor problema son los objetos tridimensionales sobre el terreno.

Los Modelos Digitales de Terreno deberían incluir las construcciones y edificaciones hasta completar modelos de ciudades. Ningún software de DEM disponible hasta la fecha ha sido generalmente extendido para manejar grandes modelos de ciudades en 3D, sin embargo versiones preliminares han sido usadas. Hay experimentos para combinar métodos de malla regular o elementos finitos con triangulación tri-dimensional (Pfeifer 2002). Pero este es aún un largo camino hasta que lleguen a estar disponibles soluciones convenientes. La captura eficiente de datos de modelos de ciudades completos necesita una combinación de los siguientes sistemas de adquisición de datos: Explorador láser terrestre y aerotransportado así como fotogrametría terrestre y aerotransportada. Actualmente solo existen planteamientos preliminares para fusionar los datos obtenidos con todas estas técnicas de adquisición.

- ***Integración dentro de SIG***

Muchas aplicaciones de Modelos Digitales de Terreno deberán ir más allá de los contenidos estrictamente geoméricos de los modelos de terreno. Junto con los modelos digitales de ciudades tales datos de información estructurada no serán muy utilizados como productos por si solos, pero jugarán un papel importante en la integración en sistemas de Geo-información (SIG). Así, nuestros conceptos actuales de DEMs constituyen un caso especial solo dentro de clases mas amplias de modelos digitales en los que se describe la realidad bi o tridimensional del terreno y de los objetos sobre este.

Otro tipo de DEMs incluirá también objetos dependientes del tiempo. La adquisición y modelado de esta dimensión adicional de DEMs tendrá gran importancia dentro del campo de la Geomonitorización.

La combinación deseada y la utilización universal de los modelos digitales requieren de estructuras en bases de datos de 3 o 4-dimensiones con posibilidad de múltiples usuarios. Las estructuras de datos de esta clase deben diseñarse de forma que sean capaces de tratar MDT híbridos y MDT TIN como clases especiales con el objeto de posibilitar conversiones de modelo TIN a DEM híbrido y viceversa a través de una interface universal. Por esa razón deben definirse formatos estándar preferiblemente definidos por el (Open GIS Consortium OGC).

Este consorcio deberá en un futuro cada vez mas próximo tratar los DEM de 3 y 4 dimensiones para permitir la interoperabilidad, y para evitar una proliferación de soluciones propietarias en el

mercado. La creciente importancia de los MDTs, pueden llegar a convertirse en uno de los asuntos de gran relevancia dentro de los servicios del OGC.

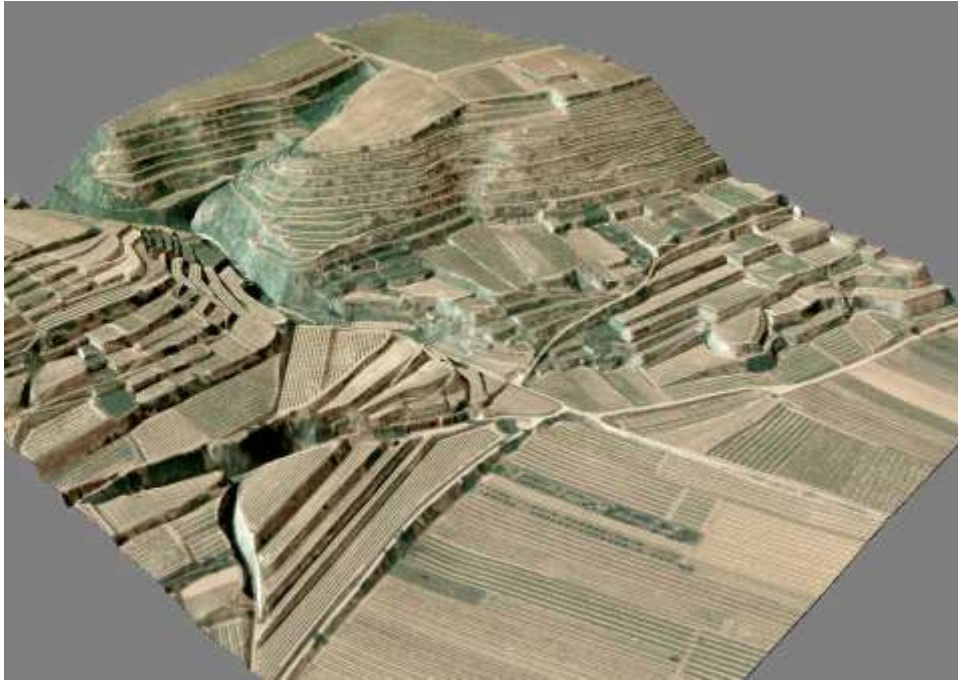


Figura 6

En la figura 6 se observa otro ejemplo de DEM híbrido, en este caso con la superposición de una ortofoto. Esta vista perspectiva ha sido realizada con el software SCOP++.