

Modelación Digital del Terreno

Recursos para la captura de datos

Digitalización: Llamase así a aquellos procesos que permiten la obtención de datos numéricos, a partir de mediciones de un objeto con el fin de determinar su forma, posición y tamaño. Tales datos suelen expresarse en forma de coordenadas planas o espaciales pertenecientes a un sistema de referencia preestablecido.

Todo proceso de digitalización requiere la ejecución de tareas tales como: Planificación, Selección y Captura de datos, que deben ser cuidadosamente realizadas para lograr una óptima descripción del objeto.

Origen de los datos: La adquisición de datos de un objeto puede ser realizada en base a mediciones directas o indirectas, es decir, en un modo real (sobre el objeto mismo), o en un modo virtual (sobre una imagen o modelo del objeto).

- Relevamientos directos de campo (Taquimetría)
- Digitalización Fotogramétrica
- Cartografía existente

Producto de la digitalización: Es el conjunto de valores numéricos, que representan la posición de elementos puntuales, discretamente distribuidos sobre la superficie del objeto.

El grado de discretización de estos elementos dependerá de:

- Tipo de relieve del objeto.
- Nivel de detalles a representar.
- Precisión del instrumento para la adquisición de datos.

Tipos de datos: Las distintas modalidades de digitalización permiten generar datos de tipo vectorial, obteniéndose como resultado coordenadas de elementos puntuales representados por entidades gráficas utilizadas para la correcta descripción del objeto en estudio.

De acuerdo a la información contenida en las coordenadas, los datos se clasifican en:

- *Planimétricos:* Con coordenadas (x,y)
- *Planialtimétricos:* Con coordenadas (x,y,z)

Estructura de los datos: Los datos colectados conforman secuencias de registros y pueden ser presentados en formato de *listas numéricas codificadas* ó bajo esquemas de *gráficos temáticos*.

En el caso de *listas numéricas codificadas*, los datos responden a una estructura simple de coordenadas planimétricas o planialtimétricas. En ambos tipos, el registro puede ir acompañado con *atributos* que le confieren *especificidad* al dato.

En el caso de relevamientos *gráficos*, el formato del registro responde a estructuras, relativamente complejas, que solo interpreta el controlador de dibujo. Tales estructuras suelen contener: *Identificador (ID) del vector y del vértice, Información espacial (coordenadas) y varios atributos de representación (color, tipo de línea, nivel desagregación, etc.)*

Sistema de referencia: Los datos medidos quedan referenciados a un sistema de ejes ortogonales, de dos o tres dimensiones, que igualmente escalados y en unidades métricas fijan, por sus coordenadas, la posición exacta de cada punto. Tal referencia puede ser realizada en coordenadas *rectangulares o polares*. Estas últimas son comúnmente utilizadas en relevamientos *taquimétricos*.

Geo-referenciación: Cuando el objeto del relevamiento pertenece a la superficie terrestre, se debe tener en cuenta que la misma está convencionalmente asociada a una elipse de revolución denominado *Geoide*. Dada la semejanza de este cuerpo con una esfera, el sistema de referencia utiliza como parámetros coordenadas angulares denominadas *Latitud y Longitud*, cuyos orígenes son el Ecuador terrestre y el meridiano de Greenwich respectivamente. *Este sistema de coordenadas denomina Sistema Geográfico.*

Si el área de estudio es de reducidas dimensiones, entonces es conveniente el uso de proyecciones cartográficas planas, que utilizan sistemas de coordenadas rectangulares facilitando la representación. No obstante es posible la *conversión* entre sistemas, que basado en transformaciones matemáticas, mediante complejos algoritmos, convierten datos de sistemas esféricos a planos y viceversa.

$$\text{Geodésico } (\varphi, \lambda, z) \Leftrightarrow \text{Rectangular } (x, y, z)$$

Modos de relevamiento:

Relevamiento	Digitalización – 2D	Digitalización – 3D	Taquimetría
Objeto	Cartografía existente	Modelos estereoscópicos	Terreno real
Origen	Cartas y mapas topográficos	Modelo virtual – 3D	Superficie real
Precisión	Gráfica	Instrumental	Instrumental y metodológica
Tipo Dato	Coord..Rectang. (x,y)	Coord. Rectang (x,y,z)	Coord. -Polares (ρ,Φ)

Restitución fotogramétrica numérica: El aprovechamiento estereoscópico de fotogramas métricos se lleva a cabo mediante un proceso denominado “Restitución Fotogramétrica” o “Estéreo-Restitución” donde el resultado final es un producto gráfico y/o numérico que, en forma abstracta, representa al objeto fotografiado.

Técnicamente, el principio básico de la restitución fotogramétrica es reconstruir espacialmente los haces de rayos que componen el par fotográfico en la situación espacial que ellos tuvieron en el momento de la toma. Esto es solamente posible en instrumentos llamados “Restituidores”, que permiten la medición de un modelo tridimensional, virtual y a escala, del objeto fotografiado.

La utilización de ordenadores ha dado lugar a importantes cambios en esta modalidad de trabajo, debido a que gran parte de las actividades es controlada desde sistemas automatizados, cada día más eficientes.

Actualmente esta tecnología, ha puesto a nuestro alcance *modernos métodos fotogramétricos digitales* donde, la precisión de la medición es un atributo de la imagen (digital) y no del instrumento de restitución disponible.

Formación el modelo: Consiste en un conjunto de operaciones básicas que conllevan a la reconstrucción de los haces de rayos en su forma y posición de igual manera que la que tuvieron durante la exposición de la toma fotográfica. Tales operaciones se conocen como:

- *Orientación Interna.*
- *Orientación Relativa (exterior).*
- *Orientación Absoluta (exterior).*

Orientación Interna: Permite la reconstrucción del haz de rayos que dio origen al fotograma. Requiere de parámetros propios de la cámara fotogramétrica, tales como:

- *Punto principal.*
- *Distancia principal.*
- *Distorsión del objetivo.*

Esta rutina se desarrolla en dos pasos: *El Centrado del fotograma* y la adaptación del proyector del instrumento a la “*Distancia principal*” de la cámara.

Centrado del fotograma, se lleva a cabo poniendo en coincidencia “el punto principal de la imagen” y “el punto principal del portaplacas”, en cada proyector del instrumento de restitución.

Distancia principal, es un valor numérico que determina la separación entre el centro perspectivo y el plano imagen de la cámara métrica. Este dato se encuentra registrado en la información marginal del fotograma y debe reproducirse con exactitud en cada proyector del restituidor.

Al finalizar ambas operaciones, queda formado el Haz de rayos en cada proyector del instrumento, con la exactitud que permite el estado operativo del mismo. Los sistemas analíticos de restitución permiten corregir las deformaciones residuales del “haz de rayos debidas” al efecto que crea la distorsión del objetivo de la cámara métrica. Si bien esto permite mayor precisión a los mediciones fotogramétrica, no es requisito indispensable para todas la aplicaciones de la fotogrametría, ya que los valores de la distorsión, en las cámaras métricas, están por debajo de las precisiones que permite cualquier instrumento analógico.

Orientación Relativa: Esta rutina permite recomponer la situación espacial de dos fotogramas consecutivos durante la exposición fotográfica. Condición por la cual todos los rayos homólogos proyectados desde ambas imágenes, se interceptan para formar un *modelo* tridimensional virtual, semejante al objeto real.

Orientación Absoluta: Proceso que permite reproducir la situación espacial de ambos fotogramas con respecto al objeto real. Tal situación se establece de acuerdo a los parámetros del sistema de coordenadas utilizado en la medición.

Dada la imposibilidad de conocer a priori y con precisión la posición exacta de cada haz de rayos, es necesario disponer cierta información geométrica, propia del objeto y su entorno, para escalar y posicionar correctamente al modelo. Tal información consiste en coordenadas espaciales de al menos tres puntos, no alineados, distribuidos sobre la superficie del objeto.

Desde un punto de vista práctico se conforma el ajuste espacial que permitirá dar nivelación, rumbo y escala al modelo estereoscópico. Finalizado este proceso, el modelo está en condiciones de ser explorado y medido, obteniéndose de él información planialtimétrica referenciada.

Apoyo Fotogramétrico: Involucra las tareas que permiten obtener la referencia de campo necesaria, para el ajuste espacial de los modelos: *Coordenadas (x,y,z) de cada punto.*

En rigor, tres puntos no alineados son condición necesaria y suficiente para la orientación absoluta de cada modelo. En la práctica, todo apoyo se diseña con más de cuatro puntos para satisfacer las condiciones de control y permitir la compensación de errores.

En función del momento en que se realice el apoyo con respecto a la obtención de los fotogramas, el apoyo se clasifica como: *Pre-vuelo o Pos-vuelo*

La obtención de puntos de apoyo exige arduas tareas de campo y costosas campañas, particularmente cuando la cantidad de modelos a restituir es demasiado grande o la zona de trabajo es de difícil acceso.

A los fines de densificar el apoyo en áreas extensas, reduciendo las tareas de campo y los costos, se recurre a un proceso de gabinete denominado *Aerotriangulación fotogramétrica.*

Aerotriangulación Fotogramétrica: Método que, mediante el uso de imágenes fotográficas, permite la densificación de puntos de apoyo por transferencia de coordenadas desde modelos con apoyo a modelos no apoyados, en tanto los mismos conformen estructuras de fajas o bloques de modelos. Este proceso se compone de las siguientes tareas:

- Planificación
- Puntinado de los fotogramas.
- Medición de los modelos o fotogramas.
- Cálculo.
- Informes

Planificación: Todo proyecto de aerotriangulación debe ser cuidadosamente planificado, bajo estrictos criterios para la distribución de los puntos de ligazón y de apoyo sobre el bloque de fotogramas. Así mismo se debe considerar la disponibilidad de puntos con coordenadas que permitirán el control de los resultados.

Puntinado de los fotogramas: Dado que este método requiere la ligazón exacta de los modelos consecutivos, ya sea para tratamientos en faja o en bloque, es imprescindible indicar en forma precisa e inequívoca la ubicación de los puntos que permiten la unión o “enganche” entre los modelos.

Estos puntos, denominados “*puntinados*”, son ubicados convenientemente en la zona de superposición de los modelos consecutivos o vecinos. Se señalizan extrayendo de la emulsión del fotograma un diminuto bocado circular que permitirá el correcto centrado del índice de medición, durante la lectura de datos.

Los puntos identificados mediante detalles del objeto se denominan “*naturales*”. Estos deben ser seleccionados estratégicamente en la faja o el bloque de modelos y funcionarán como *apoyo* para la aerotriangulación. Cuando el apoyo es de tipo *pos-vuelo* se requiere la realización de monografías detalladas para facilitar la localización de los detalles.

En caso de apoyo *pre-vuelo*, el detalle del terreno es marcado o señalado apropiadamente para luego permitir la identificación exacta del mismo. Estos puntos, se denominan “*artificiales*”.

Medición de los fotogramas: La medición de las imágenes para la aerotriangulación, puede realizarse en instrumentos denominados monocomparadores o estereocomparadores. Los primeros solo se utilizan para ciertas tareas de investigación o procesos puramente analíticos. Los estereocomparadores, en cambio, son también utilizados en aplicaciones de tipo práctico ya que permiten la visión estereoscópica como la manera apropiada de identificar el mismo detalle en dos o más fotogramas.

Los restituidores analógicos de 1º orden, son básicamente instrumentos diseñados para estas tareas ya que pueden leer coordenadas espaciales sobre el modelo estereoscópico y con la precisión suficiente para esta tarea. En este caso es de fundamental importancia que el instrumento se encuentre asistido por un computador en una configuración semi-analítica que garantice seguridad durante la gestión de los datos.

Cálculo: El cálculo de la aerotriangulación se realiza en ordenadores mediante el uso de programas específicos que en algunos casos disponen de recursos suficientes para la detección de errores. Los métodos utilizados actualmente son:

- Haces de Rayos.
- Modelos Independientes.

Cualquiera de ellos, requiere compensación matemática para la distribución de los errores accidentales introducidos durante la medición.

Informes: El informe final de la aerotriangulación consiste en un listado de coordenadas referenciadas y compensadas de todos los puntos que participaron en este

proceso. Los datos quedan discriminados por su error residual como producto de la compensación.

Digitalización taquimétrica: La obtención de datos de coordenadas medidos directamente del terreno, se realiza por métodos topográficos mediante el uso de instrumental electro-óptico de gran precisión. La información es inicialmente obtenida por observaciones directas desde los vértices de una poligonal de referencia. El resultado final, es un conjunto discreto de coordenadas x,y,z que forman una nube de puntos con la cual se tratará la superficie.

La discriminación de la información numérica es mediante códigos que introduce el operador al momento de la captura. Los mismos representan las diversas temáticas del relevamiento.

Este método permite obtener datos de gran precisión, pero demanda largas jornadas de trabajo, altos costos de campaña y solo es aplicable a terrenos de fácil acceso y de reducida extensión.

Digitalización de cartografía existente: Un método alternativo para la generación del DTM, es la digitalización de cartas topográficas existentes, sobre todo cuando no se exige alta precisión en los resultados.

El instrumento para la medición es la mesa o la tableta digitalizadora. Ambas permiten obtener coordenadas planimétricas de elementos gráficos dispuestos sobre su superficie. Las coordenadas obtenidas en el sistema del dispositivo, son referenciadas, por software, al sistema del usuario.

La calidad del resultado, depende de los siguientes factores:

- Precisión de la tableta
- Escala del Mapa
- Deformaciones del mapa

Aquí es muy importante considerar el material cartográfico a utilizar, siendo aconsejable el uso de originales en soporte poliéster, dada su alta estabilidad dimensional. En algunos casos, es posible aplicar a los datos algoritmos de corrección, para minimizar las deformaciones residuales del soporte del mapa.

Digitalización Fotogramétrica: Las tareas de relevamiento por restitución fotogramétrica, permite generar grandes volúmenes de datos, con coordenadas (x,y,z) distribuidos sobre el área de trabajo. El criterio para la adquisición de los mismos responde a modos predefinidos, mediante las cuales se debe lograr una descripción detallada y completa de la superficie en estudio.

Para organizar convenientemente la información es necesario separar temáticamente los datos creando niveles que pueden estar de acuerdo a los siguientes tipos:

- *Puntos distribuidos al azar*
- *Puntos singulares (máxima elevación o depresión)*
- *Curvas de nivel*

- *Perfiles*
- *Grillas regulares*
- *Grillas progresivas*
- *Cambio de pendiente y contorno (Líneas de: Barrancas, Vaguadas, Drenajes, etc.)*
- *Otros hechos cartografiables representados mediante entidades gráficas.*

Esta forma de relevamiento facilita la edición y el filtrado de los datos, en etapas posteriores del proceso.

	CAPA	COLOR	Tipo de línea	Entidad
1	Perfiles-A	Blanco (7)	Continúa	Punto
2	Perfiles-B	Marrón (6)	Continúa	Punto
3	Drenaje	Azul (Br)	Trazos	Mlínea
4	Construcciones	Rojo (Br)	Continúa	Mlínea
5	Alto-Barranca	Magenta (Br)	Continúa	Mlínea
6	Bajo-Barranca	Magenta	Continúa	Mlínea
7	Crestas	Amarillo	Trazos	Mlínea
8	Punto-cota	Amarillo	Continúa	Punto
9	Perímetro	Verde (Br)	Trazo-pto	Mlínea
10	Talud-Alto	Rojo	Continúa	Mlínea
11	Talud-Bajo	Verde	Continúa	Mlínea
12	Corrige	Celeste	Continúa	Mlínea

Ejemplo: Configuración de 12 capas de información gráfica

Relevamiento fotogramétrico: La tarea de relevamiento de datos debe ser asistida por algún software, cuyas capacidades gráficas deben permitir visualizar cada entidad al momento de su captura. Las entidades son mostradas en pantalla con los atributos de color y tipo de línea, según la capa a la que pertenecen y que son definidas durante la configuración del trabajo.

Durante el proceso los datos deben ser geo-referenciados, por el Software, mediante los parámetros obtenidos en el ajuste (Orientación Absoluta) de cada modelo.

Digitalización de curvas de nivel: Esta tarea de restitución requiere de un modelo estereoscópico orientado, en forma absoluta, sobre el cual se realizará la medición. En restituidores analógicos es posible nivelar y poner a escala al modelo en forma efectiva, permitiendo la exploración del mismo según planos horizontales con ($z = \text{cte.}$).

Así las curvas de nivel se obtienen a partir del seguimiento, por parte del operador manteniendo un contacto virtual entre la marca de medición y la superficie del modelo, realizando la exploración en los sucesivos planos horizontales, paralelos y equidistantes. Cada curva queda definida como una poligonal gráfica.

La equidistancia se adopta considerando parámetros tales como:

- Precisión del restituidor
- Escala de los fotogramas (Altura de vuelo)
- Pendiente media de la zona

En forma práctica general suele considerarse como un valor entero entre de 3 a 5 veces el valor de la precisión de las curvas de nivel.

$$N = 3 \dots 5$$

$$\text{Equidistancia} = N \times \text{Precisión de Curva de Nivel}$$

La densidad de los vértices de la poligonal que representa a la curva, se define como base al nivel de detalles del objeto que se desea a representar. Es importante tener en cuenta que al aumentar la densidad de los datos aumenta, considerablemente, el tamaño de los archivos y los tiempos empleados en la captura.

Digitalización de perfiles: En esta modalidad de relevamiento, el modelo es explorado en forma de perfiles alineados con el eje “Y”, del restituidor. Para ello, no es condición necesaria que el modelo se encuentre orientado en forma absoluta, ya que el programa de asistencia a la restitución debe ser capaz de geo-referenciar los datos durante la lectura de los mismos. Aumentando notablemente el rendimiento de captura de los datos.

En general se debe contar con algunas soluciones para provocar la captura automatizada de los datos. Estos automatismos deben actuar durante la exploración del perfil pudiendo adoptarse alguna de las siguientes formas:

- *Por intervalo de tiempo (Requiere velocidad de exploración cte.)*
- *Por intervalo de distancia planimétrica (en la dirección del perfil)*
- *Por intervalo de variación altimétrica (en la dirección Z)*

En algunos casos de superficies con relieves complejos y quebrados, la captura automatizada de datos puede condicionarse a la variación altimétrica (Z) del terreno a lo largo del perfil, lo cual determina una distribución planimétrica cuasi aleatoria de la información, sin que intermedie el criterio del operador de restitución, al menos en una dirección.

El intervalo de variación altimétrica se debe fijar, en cada caso, de acuerdo a la escala del modelo y la magnitud de los desniveles.

La separación entre los perfiles del muestreo se debe condicionar al tipo de relieve, del área en estudio, densificándolos en aquellas zonas donde se observe de mayor variabilidad.

Inicialmente se pueden relevar perfiles separados a una distancia constante 2 o 4 veces mayor que la distancia mínima prefijada. Luego, observando en pantalla el despliegue planimétrico

de los perfiles se podrán intercalar perfiles intermedios, completos o a tramos, hasta completar la densidad de datos requeridos.

Este método es de utilidad en los sistemas asistidos por ordenador pudiendo realizar una captura ordenada que permite densificar datos en las zonas donde estos son verdaderamente necesarios. Este modo de muestreo no es suficiente y se deberá complementar con la digitalización de detalles.

Digitalización de cadenas de datos: Para la captura de los detalles característicos del terreno, tales como: drenaje, vaguadas, barrancas, crestas, etc., se debe realizar la digitalización de los elementos lineales del terreno donde se producen los cambios de pendiente. Esta información a modo de *cadenas o strings* de datos son secuencias de puntos, vinculados entre sí, que forman poligonales abiertas o cerradas de igual condición temática.

Esta modalidad para la captura de detalles genera una distribución planimétrica irregular, y dada su importancia en la modelación de superficies, es conveniente que el espaciamiento entre sus datos sea suficientemente pequeño para reproducir fielmente el rasgo que se desea representar.

Digitalización de puntos discretos: Estos datos representan un nivel de información de gran importancia en la modelación de superficies, ya que permiten la correcta terminación en las zonas de *elevaciones o depresiones máximas del terreno*.

Se representan por puntos de coordenadas que completan el relevamiento. Su función se extiende al proceso cartográfico donde el valor de la coordenada (Z) es utilizado como leyenda altimétrica en la cota del remate.

Algunos de estos puntos son utilizados como elementos de control para los procesos de captura y generación del modelo digital.

Digitalización de hechos cartografiables: Ciertos detalles dispuestos sobre la superficie en estudio y que corresponden a hechos naturales o artificiales, representando uno o varios niveles de información, deben ser digitalizados durante la captura de datos ya que, aunque no participen en la modelación, serán utilizados en la edición cartográfica del mapa.

Los detalles se digitalizan según el hecho que representan, utilizando entidades gráficas simples tales como: *puntos, líneas, rectángulos, arcos, etc.*

Almacenamiento y Archivos: Los datos de coordenadas, de cada relevamiento, son almacenados en formato digital de acuerdo a una estructura propia que generará el programa de asistencia a la restitución.

A los efectos de evitar datos erróneos o que excedan los límites del relevamiento, es necesario realizar un proceso de depuración y control, en un ambiente informático que permita la visualización y edición de los mismos.

Exportación de Archivos: A los efectos de migrar los datos a un ambiente CAD, O SIG es conveniente convertir a un formato estándar para intercambio de archivos gráficos.

El formato “DXF”, bajo una estructura de datos ASCII o Binaria, cumple satisfactoriamente este requerimiento permitiendo la compactación de los mismos en caso de ser necesario para su transportabilidad.

Edición y Pre-proceso de los datos

Edición de Datos: Durante cualquier proceso de captura de datos, se producen errores que en algunos casos son detectados e inmediatamente corregidos, pero en otros casos estos pasan desapercibidos y luego deben ser corregidos en un delicado proceso de edición. Para esta tarea, es apropiado el uso de programas de edición gráfica que admitan datos con estructura vectorial, siendo preferible aquellos que permitan la generación de visualizaciones perspectivas (3D) facilitando el control de los mismos.

Considerando que gran parte de los errores que se pueden producir, son del tipo accidental, difíciles de detectar y no pueden ser eliminados fácilmente, lo cual contribuyen a degradar la calidad final del DTM.

Para la edición del gráfico es conveniente realizar las siguientes tareas:

Preparación de los datos

- Conversión de formatos (DXF) al formato propio del CAD.
- Unión de archivos gráficos

Visualización planimétrica de las entidades relevadas

- Control de capas y correspondencia temática de las entidades
- Control de atributos o propiedades
- Control de cierre en entidades poligonales cerradas

Visualización en 3D del gráfico

- Control de la coordenada (Z) de curvas de nivel
- Control geométrico y espacial de las entidades
- Eliminación de datos redundantes en las zonas de solapamiento
- Eliminación o corrección de entidades con error

Adaptación de formatos y filtrado: Cada software de tratamiento de superficies maneja un formato de datos propio, bajo estructuras de singulares características, diseñados para administrar eficientemente la información. Tales estructuras no son accesibles al usuario, pero es posible alimentar a estos sistemas, con información generada en otros sistemas, en tanto los mismos sean apropiadamente adaptados.

Las listas ASCII o archivos con formato DXF son reconocidos, como entrada estándar en el intercambio de información. En el caso de listas ASCII, dicha información debe estar ordenada bajo ciertos criterios temáticos, que el software de modelación deberá aceptar correctamente.

La colección de datos puede ser filtrada espacialmente por el CAD, que asume como límites de coordenadas a transferir, los valores extremos indicados por el usuario:

X mín - **X** máx
Y mín - **Y** máx
Z mín - **Z** máx

Otra condición de filtrado está dada por la situación de los ejes planimétricos que puede ser permutada para adaptar distintos sistemas de coordenadas.

La adaptación de formatos es un poco menos fácil de lograr y en algunos casos es conveniente el desarrollo de rutinas, en algún lenguaje de programación, que permitan modificar la estructura de los datos.

Modelación de Superficies

Modelo Digital: Es una colección de datos numéricos que representan de forma simplificada una o varias consideraciones temáticas, de un objeto, relacionadas al mismo mediante algoritmos específicos. Cuando el objeto en estudio es la superficie terrestre, tales modelos reciben la denominación de Modelos Digitales del Terreno (DTM).

Existe, comercialmente, variado *software* que disponen diversos métodos y opciones para la obtención del modelo digital. Estos métodos, basados en la generación de grillas regulares o redes de triángulos pueden dar, para un mismo conjunto de datos, resultados diferentes o con ligeras variaciones. Por esta razón es conveniente probar algunas de estas variantes hasta encontrar aquella que represente con mayor fidelidad los rasgos característicos de la superficie en estudio.

Modelo Digital del Elevaciones (DEM): Designación que recibe un DTM cuando el único elemento temático, considerado en la modelación, es la altimetría del terreno.

Grillado de una superficie: Proceso de cálculo mediante el cual es posible obtener nuevos datos (XYZ) de puntos o nodos dispuestos en forma de una grilla, regularmente espaciada, a partir de datos puntuales de la superficie distribuidos al azar.

Para ello es posible utilizar diversos esquemas de interpolación que, basados en observaciones, estiman el valor de la superficie donde originalmente no existen datos. Luego esta grilla es reutilizada para generar mapas de contornos, mapas de superficies, mapas temáticos, mapas en perspectivas, estructuras de alambre y otros.

Puede observarse, en el uso de estas grillas, tiene ciertas ventajas relacionadas con el ordenamiento y búsqueda de los datos que, en tareas tales como: dibujo de curvas de nivel o contorno, determinaciones volumétricas y de superficies, modificaciones y edición de datos, etc. permiten rápidos y eficientes procesos de cálculo. Como desventaja se debe considerar que los nodos de la grilla, generalmente, no conservan el dato original y los mapas son obtenidos desde información interpolada.

El efecto negativo más importante a considerar ocurre durante el grillado, cuando ciertos algoritmos de búsqueda que no respetan condiciones de entorno, originando formas extrañas en los bordes de la superficie. Esto puede contrarrestarse definiendo áreas de relevamiento

que cubran en más, los límites del grillado, con lo cual el volumen de los archivos se incrementa entre el 15 % y 20%.

Algunos métodos de grillado, utilizan para la definición del valor de cada nodo, algoritmos de interpolación basados en promedios pesados. Esto significa que los datos tienen diferente grado de participación en función de ciertas variables de relación. En aquellos casos donde la variable de relación es la distancia, los puntos más cercanos al nodo, tienen influencia mayor en la determinación del valor del nodo, que los puntos de mayor alejamiento.

Densidad de la Grilla: La forma de una grilla se define por el número de filas y el número de columnas que forman una estructura regular, de distribución planimétrica de los datos (coordenadas X,Y). Cada nodo queda definido por la intersección de filas y columnas. Siendo la coordenada Z, el valor o atributo correspondiente a altura del dato.

El producto entre filas y columnas, es una medida del tamaño o densidad de la grilla. Es importante, desde el punto de vista práctico, definir con buen criterio este factor ya que existe una relación directa entre la densidad de la grilla y el tiempo requerido para generarla.

Si bien las grillas densas permiten formas suavizadas en gráficos de líneas, se debe tener en cuenta que para trabajar cómodamente es necesario disponer de equipamiento informático con gran capacidad memoria, y espacio en disco suficiente para el almacenamiento de los archivos. También se debe considerar estas condiciones para la transportabilidad de la información.

Actualmente existe, en el mercado, ordenadores de gran performance en velocidades de procesamiento y capacidades de memoria, que permiten el manejo cómodo de volúmenes grandes de datos.

El espacio de almacenamiento de datos digitales ya no debe ser una preocupación, pues se comercializan discos duros que superan la decena de GBytes. De igual manera, para la seguridad de los datos se han desarrollado dispositivos de almacenamiento permanente tales como discos: magnéticos (Zip) y Ópticos (CDs), y además un variado tipo de software para la compactación de la información, facilitando así el transporte de la misma.

Interpoladores exactos y Suavizadores: Los métodos de grillado pueden dividirse en dos grandes categorías: *Interpoladores exactos* y *Suavizadores*, cuyas características difieren de uno a otro, en que los nodos de la grilla conserven o no, los datos originales para la generación del modelo digital.

Los interpoladores exactos pueden mantener el valor “Z” del dato, cuando el punto cae exactamente sobre un nodo de la grilla. En este caso el peso asignado al dato es igual a 1.0 y los demás datos participan sin peso o con peso cero. Para aumentar la probabilidad de obtener puntos exactos durante la interpolación es conveniente utilizar en la captura de los datos el criterio de “Grilla Regular”.

En los suavizadores, la definición del valor Z del nodo se logra con la participación de los datos de su entorno, asignándole a estos un factor de peso en función de alguna variable de relación. En este caso, sólo se asigna peso uno ($P=1$), al dato que coincida exactamente con el nodo de la grilla, los demás datos solo participan con peso menor.

Métodos de interpolación para el grillado: Estos métodos tienen como función la determinación del valor “Z” del nodo durante la interpolación.

Inversa de la Distancia: Se basa en la determinación del grado de participación de los datos, en función su distancia al nodo. Esta participación se mide *pesando* la influencia del punto en *función inversa de una potencia de la distancia* que los separa de dicho nodo .

Es un método de procesamiento rápido, pero que presenta cierta tendencia a generar patrones de contorno concéntricos, denominados “Ojos de Buey”. Estos generados alrededor de algunos datos puntuales hacen perder calidad al DTM.

Shepard: Similar al método “*Inversa de la Distancia*” pero no tiene la tendencia a generar los patrones circulares mencionados en ese caso, sobre todo si se usan funciones de suavizado para la presentación de los resultados.

Kriging: Es un procedimiento muy flexible ya que permite el grillado con diversos tipos de dato. Requiere el uso de variogramas para definir el peso asignado a los mismos.

Aplicado con un variograma lineal es suficientemente efectivo en la mayoría de los casos, por lo cual es muy recomendado en el tratamiento estadístico de información.

Para su uso en la modelación de formas aleatorias, debe ser condicionado cuidadosamente a fin de controlar la tendencia suavizadora de sus algoritmos de interpolación.

Su mayor inconveniente reside en la lentitud para el tratamiento de grandes masas de datos, debido a los numerosos cálculos que debe realizar.

Curvatura mínima: Con capacidad para generar superficies suaves, siendo suficientemente rápido en el tratamiento de grandes volúmenes de dato.

Vecino cercano: Su mayor eficiencia se muestra cuando los datos de entrada están dispuestos aproximadamente formando una grilla. También cuando es necesario que las grillas tengan nodos de valor nulo en aquellos lugares donde no existen originalmente datos, es decir zonas de “hueco”.

Regresión polinómica: Tiene capacidad para determinar la tendencia de un conjunto de datos. Es un método muy rápido para el tratamiento de grandes volúmenes de información aunque, se debe considerar que, durante la generación de la grilla se pierden detalles locales, no calificando como un buen interpolador para uso cartográfico. Siendo útil para el control, análisis y verificación de superficies.

Funciones Básicas Radiales: De usos variados y muy versátil que produce resultados similares al método de *Kriging*. Tiene capacidad para generar superficies suaves mediante la integración de un factor de suavizado. Es un *interpolador exacto que preserva la integridad de los datos originales*.

Dispone de funciones similares a los variogramas utilizados en el método de *Kriging*, que controlan la participación de los datos durante la interpolación.

Triangulación con Interpolación lineal: Este recurso se basa en la generación de superficies triangulares planas, cuyos vértices contienen los datos originales. Estas facetas triangulares elementales se distribuyen cubriendo la superficie modelada bajo la condición que ningún triángulo puede solaparse con otro. Este método es suficientemente rápido con cualquier tipo de datos.

Cada triángulo define un plano apoyado sobre los nodos de la grilla, donde la inclinación y la elevación, son parámetros determinados por los tres puntos de origen.

Presenta como ventaja, frente a los demás métodos, la de conservar las formas irregulares de la superficie aportados por las líneas características, contenidas en el conjunto de la información. Se debe considerar a tales líneas como los detalles finos o significativos de la superficie, donde se producen quiebre o cambios de pendiente.

Desde el punto de vista de su aprovechamiento en la generación de cartografía, este método merece especial consideración ya que permite evidenciar, claramente, las inflexiones producidas por los detalles característicos del relieve, tanto es así en los mapas de contornos como en otros DTM.

Modos de Búsqueda de datos: La búsqueda de los datos para el cálculo del valor de los nodos, se realiza según ciertos criterios de selección que ordenan la extensión del proceso en base a un área circular. A su vez la búsqueda se puede condicionar a la exploración por sectores buscando: Entre *Todos los datos, por Cuadrantes Octantes*.

Entre Todos los datos: Este método es apropiado para tratar pequeñas colecciones de datos, 200 o 300 puntos, y utiliza a todos para el cálculo de cada nodo de la grilla. Permite gran velocidad de grillado y la distancia del dato al nodo es utilizada como factor de peso.

Búsqueda Simple: Este método, solo utiliza como dato aquellos puntos que se encuentren en las cercanías de los nodos de la grilla. El número de puntos utilizados en el cálculo es definido por el valor asignado a la cantidad de datos por sector

Datos por Sector. La búsqueda se organiza por sectores, los cuales tienen por origen el nodo considerado, siguiéndose a través de todos los datos, hasta encontrar aquellos más cercanos al nodo. Finalmente para el cálculo del valor del nodo son considerados los que se encuentran dentro del círculo de permisión.

Por Cuadrantes: Este método considera el entorno a cada nodo de la grilla, dividido en cuatro sectores denominados *Cuadrantes*. Luego toma en cada uno de ellos los puntos más cercanos al nodo y finalmente, durante la interpolación, cada cuadrante es analizado en forma separada.

Por Octantes: Este método considera el entorno, a cada nodo de la grilla, dividido en ocho sectores denominados *Octantes* y busca en cada uno de ellos los puntos más

cercanos al nodo. También, cada octante es analizado en forma separada durante la interpolación.

Este método es un poco más lento que la búsqueda por cuadrantes, pero genera grillados más suaves.

Reglas de Búsqueda: Estas reglas permiten condicionar el criterio para la selección de los datos que participan en la interpolación del valor de cada nodo. A este efecto es posible condicionar: *Número de puntos por sector, el tamaño del círculo o elipse de búsqueda, condiciones de participación y peso, etc.*

Número de datos por sector: Especifica el número de datos que intervendrán, desde cada sector, en la generación del valor del nodo.

Elipse de búsqueda: Figura elipsoidal que limita el área de búsqueda. La forma y el tamaño de la elipse representa el área, en torno al nodo, donde se seleccionarán los datos.

Mínimo Total de Datos: Especifica el mínimo número de datos, dentro de la elipse, que son necesarios para calcular el valor del nodo. Si el número de datos es insuficiente para satisfacer el criterio de búsqueda elegido, el nodo queda asignado con un valor específico que indica esta situación. Estos nodos se denominan *Nodos vacíos* y producen en el DTM regiones hundidas que se deben evitar.

Número máximo de sectores vacíos: Especifica el máximo número de sectores sin datos que pueden existir al momento de calcular el valor del nodo. Si los sectores vacíos superan este valor, el valor del nodo queda asignado al de *Nodos vacíos*

Anisotropía: La anisotropía representa el factor de homologación para ciertas características de distribución de datos dentro de un sistema. Su aplicación durante el grillado, permite fijar una dirección de preferencia o de relevancia.

Este factor induce a especificar una condición al estado de los datos, dando mayor preferencia a la información dispuesta en una cierta dirección.

En general, no es necesario emplear la anisotropía cuando las coordenadas planimétrica de los datos se encuentran a la misma escala. En cambio, es de gran utilidad cuando los datos poseen tendencias, como es el caso de los obtenidos por digitalización de curvas de nivel o perfiles de alta densidad y gran espaciado.

Es considerablemente útil para corregir datos obtenidos mediante la digitalización de cartas o mapas que han sufrido deformaciones del soporte en uno de los ejes.

Tamaño de la grilla: Al definir la grilla se debe disponer de un área de datos mayor que el área de grillado para evitar extrapolaciones erróneas. Es conveniente definir radios de búsqueda que no superen en tamaño la diferencia entre estas áreas.

Operaciones matemáticas con Grillas: Las grillas puede ser usadas para combinar el valor de sus nodos en tanto estas tengan la misma disposición planimétrica. Como resultado de esta operación se crea una nueva grilla, que es función de la interacción entre los atributos de los nodos de las grillas de origen.

En cuanto al valor del nodo, este es el resultado de la operación matemática indicada, por ejemplo: La grilla "C" contiene las diferencias altimétricas entre los nodos de las grillas "A" y "B"

$$Z_c = Z_a - Z_b$$

La nueva grilla puede ser utilizada para la generación de gráficos de líneas de contorno y/o superficies, cálculos de volumen y/o superficie, etc.

Las funciones matemáticas pueden también aplicarse a una grilla única. El resultado será otra grilla de iguales características, donde el valor de los nodos contendrá el resultado de la operación matemática aplicada. Por ejemplo:

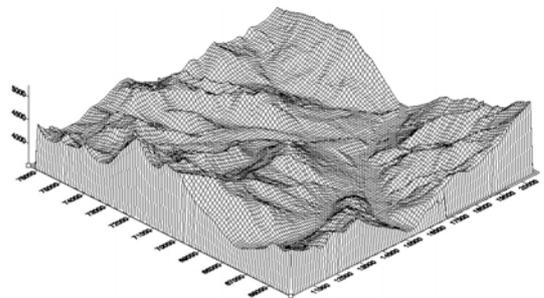
$$Z_c = Z_a + 320$$

En este caso todos los nodos de la grilla "C", serán los mismos nodos de la grilla "A", más un valor constante (320), que en términos de un DTM significa que la superficie se elevó 320 unidades métricas.

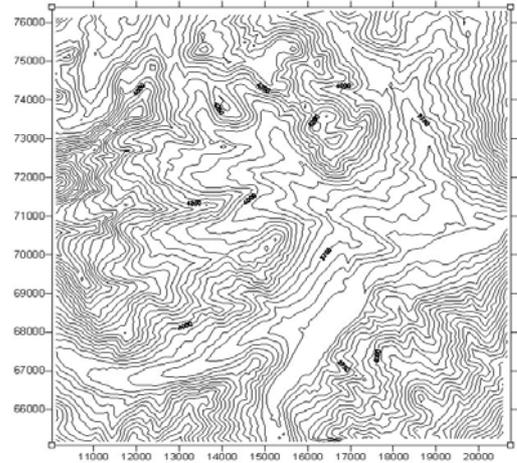
Productos derivados del DTM y Simulaciones

A partir de la generación del modelo digital, es posible obtener productos derivados entre los cuales consideramos por su utilidad los que a continuación se detallan:

Estructuras de alambre: Reciben este nombre las visualizaciones perspectivas del DTM, logradas mediante estructuras gráficas, construidas con líneas que unen los nodos del grillado. Observándose el ordenamiento de sus filas y columnas con el aspecto de una malla de alambre, emulando la superficie del terreno.



Mapas de Isohipsas: Estos son gráficos, en proyección ortogonal, de líneas que representan sucesiones de puntos con igual elevación, conocidas como *curvas de nivel*, dando información planialtimétrica sobre la morfología del terreno.



Perfiles o Secciones transversales: Un perfil representa una sección de corte vertical, del objeto, obtenido por la intersección del modelo con planos verticales. La dirección del perfil se obtiene siguiendo la dirección de una línea poligonal trazada sobre la superficie del DTM.

Ejemplos de esta utilidad, son los estudios topográficos con fines viales.

Simulación: Se entiende como tal a todo proceso de ensayo que permita el análisis del comportamiento de ciertas variables bajo condiciones apropiadas, a los fines de estudios. Tales variables pueden representar fenómenos, estáticos o dinámicos, que aplicados virtualmente a la estructura de un DTM, generan un medio óptimo para su análisis.

Un ejemplo de simulación aplicada a DTM son los mapas que se detallan a continuación.

Mapa de sombras: *Imágenes de tipo Raster obtenidos a partir técnicas de reflexión de la luz aplicadas a la grilla de un DME.*

Estos mapas usan diferentes gradaciones de gris o color para indicar las pendientes de la superficie de cada celda de la grilla.

La posición relativa de la fuente de luz, es definida por el usuario simulando la existencia de un Sol virtual. El programa determina la orientación de la superficie de cada celda de la grilla y le asigna un color único. Esta última condición hace que los mapas obtenidos sobre grillados poco densos den resultados de baja calidad.

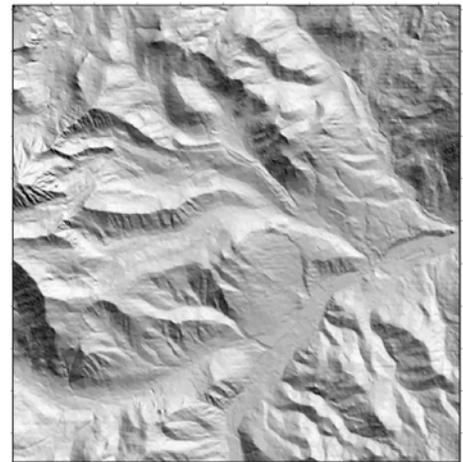
El color o la tonalidad de la superficie es asociada a los valores de porcentaje de luz reflejada por cada celda. Así el 100% del color es asignado a las celdas donde los rayos de luz son perpendiculares a la superficie del DTM. Ángulos menores entre la superficie y la dirección de la luz definen los tonos intermedios y sombras.

Ángulo (°)	Luz (%)	Color
90	100	255 (Blanco)
45	50	127 (Gris)
0	0	0 (Negro)

Esta particularidad permite el estudio del soleamiento en terrenos destinados a proyectos viales. Citando como ejemplo las zonas de montaña donde los caminos, en épocas invernales, cubiertos por la nieve, requieren costosas tareas de mantenimiento que pueden evitarse evaluando ciertamente esta situación.

Es posible crear mapas de sombras en color usando cualquier combinación de ellos. El usuario selecciona solo los colores extremos y los de máxima representación. La variación intermedia es creada automáticamente por el software que utiliza este recurso para la simulación.

Los Mapas de sombras pueden crearse independientemente de otros mapas o ser combinados con otros mapas permitiendo superponer su información.

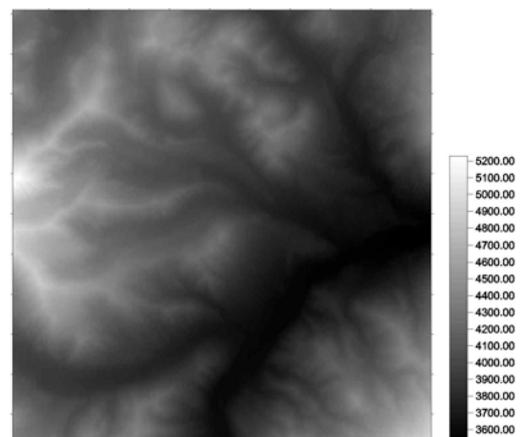


Sobre estos mapas es posible realizar cambio de escala y traslaciones, no permitiéndose las rotaciones e inclinaciones del DTM y solo en algunos casos es posible desplegarlos sobre una estructura de *malla de alambre* para su observación en perspectiva.

Mapa de elevaciones: Son mapas Raster obtenidos a partir de Grillas que mediante la gradación de gris o color representan la elevaciones del terreno.

Es necesario definir dos colores extremos, mínima y máxima elevación. Luego un automatismo específico forma los colores intermedios, mezclando proporciones variadas de estos dos colores básicos.

Para este proceso se considera a las *elevaciones* como la variable de simulación cuyos valores porcentuales se asignan un único color, en el rango de 0% - 100 %, correspondiendo para:



Elevación	Valor de Z	Color
Mínima = 0%	Mínimo	1
Intervalo	Medio	Mezcla 1 y 2
Máxima = 100%	Máximo	2

Es posible crear mapas de elevaciones usando cualquier combinación de colores. Finalmente es posible realizar con ellos operaciones tales como: Cambio de escala, tamaño y traslaciones.

Al igual que en los mapas de sombras no es posible girar e inclinar el modelo, y tampoco es posible desplegar esta imagen sobre estructuras de alambre para su observación en perspectiva.

Metodología

Se ha implementado una metodología de trabajo para la obtención del DTMs, apoyada en el equipamiento fotogramétrico e informático del Centro de Fotogrametría y Catastro de la UNSJ y programas de computación de bajo costo, entre ellos algunos de desarrollo propio.

La secuencia de actividades está contenida en las siguientes etapas:

Planificación
Selección de pares fotográficos
Apoyo Fotogramétrico
Geo-referenciación
Aerotriangulación
Ajuste de los modelos
Captura de datos
Criterio1: Curva de nivel más cadenas
Criterio2: Perfiles más cadenas
Pre-proceso
Edición (CAD)
Filtrado de datos
Adaptación de formatos
Proceso
Generación del DTM
Representaciones planas y perspectivas
Edición Cartográfica
Generación del Mapa

De esta secuencia, las actividades que requieren mayor atención son las relativas a la captura de datos, etapa en la cual se cometen algunos errores debido fundamentalmente, al elevado grado de concentración necesario durante las tareas.

Al efecto de detectar y corregir errores sistemáticos y/o groseros, se recomienda la edición en ambientes CAD, que además permite limitar el área de los datos eliminando toda información no deseada.

Posteriormente a la etapa de edición y previo a la generación del DTM es necesario un tratamiento a los datos para adaptarlos a los requerimientos del software de modelación. Este pre-proceso incluye el filtrado espacial y las modificaciones a la estructura de los datos de acuerdo al formato que acepte el modelador.

Con la aplicación de esta metodología se aprecia una considerable disminución de los tiempos requeridos para la obtención del producto cartográfico, comparando con los tratamientos convencionales disminuyendo entre el 40% y el 50% el tiempo requerido en la captura de datos y edición de mapas finales.

Actualmente, la generación de *productos ortofotográficos* por procesamiento de imágenes digitales requiere, como base para la corrección altimétrica, modelos digitales de elevación (DEM) precisos y confiables, lo cual abre un nuevo campo de aplicación para esta línea de producción cartográfica.

Bibliografía

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of Photogrammetry – 4º** Edición –.1980 - Virginia – U.S.A.

JOHN CAMPBELL. **Introductory Cartography** — Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey 07632. U.S.A.

ALBERTZ KREILING. **Manual Fotogramétrico de Bolsillo** – Herbert Wichmann Verlag-Karlsruhe - 1975 - Germany

ANGEL MANUEL FELICÍSIMO. **Modelos Digitales del Terreno** — Pentalfa Ediciones. Apartado 360 / 33080 - Oviedo - (España).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN - **Desarrollo de un Sistema de Modelos Digitales del Terreno (DTM) y su Aplicación a la Glaciología**. Informe de proyecto - 1989 - San Juan - Argentina

CHUECA PASOS, N. **Topografía. Tomos I y II**. – 1982 – Editorial Dossat, S.A. – 1982 - Madrid – España.

GOLDEN SOFTWARE INC. - **Manual del Usuario Programa SURFER. Versión 6.4**. 1987. U.S.A.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN - **Cartografía Digital desde Procesos Fotogramétricos – Parte I. – Desarrollo de técnicas de relevamiento fotogramétrico numérico para mapeo automatizado** - Informe de proyecto - 1994 - San Juan - Argentina

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN - **Cartografía Digital desde Procesos Fotogramétricos – Parte II - Aplicaciones y alcances de la modelación digital de terrenos en la producción cartográfica** - Informe de proyecto - 1999 - San Juan - Argentina