



Tema 3



SIG y Modelos Digitales del Terreno: generación y análisis

Asignatura obligatoria G-180 Los Sistemas de Información Geográfica I (Raster). Grado en Geografía y Ordenación del Territorio. Curso 3º. Universidad de Cantabria.

Profesora: Olga DE COS GUERRA.

Profesora titular de la Universidad de Cantabria.

Área: Geografía Humana.

Licencia: Creative Commons BY-NC-SA 4.0 Internacional

 Este tema trabaja de forma monográfica el MDT como variable fundamental en los análisis SIG y en los estudios geográficos. Encontrarás dos unidades temáticas; la primera se centra en la generación de modelos digitales de elevaciones, mientras que la segunda unidad aborda las operaciones de análisis espacial a partir de modelos digitales de elevaciones.

Índice de contenidos

	Página
UNIDAD 1. GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES	4
Bloque 1.1. Conceptos de base: MDT y MDE	4
Bloque 1.2. Los datos altimétricos de partida	5
Bloque 1.3. La interpolación espacial: definición y clasificación	8
Bloque 1.4. La creación de modelos digitales de elevaciones basada en la interpolación TIN	10
4.1. Fase 1: Interpolación de un MDE mediante la construcción de una red irregular de triángulos	
4.2. Fase 2: La optimización del modelo mediante el método B/T	
4.3. Fase 3: Transformación de la red de triángulos en una malla raster	
Bloque 1.5. La creación de modelos digitales de elevaciones basada en la interpolación raster	15
5.1. Fase 1: Rasterización de los datos altimétricos vectoriales de partida	
5.2. Fase 2: Interpolación raster	
UNIDAD 2. ANÁLISIS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES	18
Bloque 0. Introducción: La clasificación de las operaciones espaciales de diverso tipo	18
Bloque 2.1. El MDE como elemento en común de operaciones espaciales de diverso tipo	21
Bloque 2.2. Análisis de pendientes en un SIG raster	21
Bloque 2.3. Análisis de orientaciones en un SIG raster	25
Bloque 2.4. Análisis de visibilidad	26
4.1. Cálculo de cuencas de visibilidad	
4.2. Cálculo del horizonte visible	

Bloque 2.5. Análisis hidrológico	29
5.1. Cálculo de cuencas de drenaje	
5.2. Cálculo de la acumulación de flujo	
Bloque 2.6. Presentación de información asociada al MDE	33
6.1. Mapas de sombras o relieve sombreado	
6.2. Perfiles	
Bibliografía	35

UNIDAD 1: GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES



Bloque 1.1. CONCEPTOS DE BASE: MDE Y MDT

Con frecuencia se utilizan los términos MDE (Modelo Digital de Elevaciones) y MDT (Modelo Digital del Terreno) como sinónimos; si bien, no se trata de términos sinónimos, estando los MDE incluidos dentro de los MDT.

$$\text{MDE} \neq \text{MDT} \rightarrow \text{MDE} \in \text{MDT}$$

Son muchas las definiciones que podemos encontrar de estos términos.

 M.A. Felicísimo define MDT como “*una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua*”.

 Una de las claves de esta definición radica en la consideración de MDT cuando se representa una **variable cuantitativa y continua**. Sobre esa base general, en el caso específico de que la variable cuantitativa y continua represente **altitud** se puede denominar MDE, Modelo Digital de Elevaciones; por ello, el concepto de MDE es un caso específico de MDT.

 En esta línea J. Bosque Sendra (1992) hizo la siguiente puntualización basándose en Cebrián y Mark (1986): “*Un MDT generalmente representa la topografía del terreno, es decir, las altitudes en cada punto (pixel) de un territorio. Pero, en realidad, se puede crear un MDT de cualquier hecho que cumpla unas mínimas características, esencialmente la continuidad espacial de la variación (...) De este modo, otros muchos aspectos físico/naturales, tales como precipitaciones, las temperaturas (...) se pueden representar y analizar como un MDT*”.

Los modelos de datos y estructura de los MDT pueden responder a un raster de celdas regulares, a una malla de puntos vectoriales, a un modelo de triángulos (TIN), etc. En todos los casos es necesario registrar la localización XY de las mediciones y el valor (variable a representar en cada entidad pixel o punto).

Su incorporación y tratamiento es fundamental en el análisis SIG, ya que buena parte del estudio aplicado territorial descansa en el análisis del relieve, de sus formas y de sus implicaciones en el medio natural y en el desarrollo de las actividades humanas.

En un entorno SIG, la representación y estudio del relieve se aprovecha de potentes herramientas analíticas, basadas en el almacenamiento de la información altimétrica. La generación de este tipo de modelos digitales numéricos introduce al usuario en cuestiones referidas a la calidad de la información altimétrica, las diferentes funciones de interpolación espacial o el empleo de estructuras de datos vectoriales y matriciales (raster) para su almacenamiento.

Asimismo, la disponibilidad de un MDE permite obtener otras medidas derivadas (pendiente, orientación, sombreado, etc.), visualizaciones gráficas (perfiles topográficos), o realizar cálculos más complejos en los que la superficie topográfica es determinante (cuencas de visibilidad, horizontes visibles, cuencas hidrográficas, acumulación de flujo, etc.), cuestiones que se abordarán en la Unidad 2 del presente tema.

MDT	MDE
	
Variable continua	Variable continua altitudinal
Raster	Raster

Bloque 1.2. LOS DATOS ALTIMÉTRICOS DE PARTIDA

La fuente de información necesaria para la construcción de un MDE es normalmente un documento cartográfico de base. Resulta fundamental el soporte en el que se dispone de la información inicial, pudiendo estar ésta en soporte analógico o bien digital.

a) Soporte analógico: preparación de las curvas de nivel

Si se dispone de un mapa analógico con curvas de nivel el primer paso a realizar es su digitalización. Es necesario trasladar la información contenida desde un soporte analógico (papel, poliéster) a formato digital mediante una mesa o una tableta de digitalización, o bien mediante el escaneado del mapa original y su posterior digitalización en pantalla (escaneado → digitalización a partir de vectores con altitud Z).



Cualquiera de estas soluciones implica una transformación del dato original y por consiguiente un margen de error posicional añadido.

b) Uso de la fotografía aérea

Los datos altimétricos se dibujan en el mapa como curvas de nivel y puntos de cota, y proceden de una captura por métodos fotogramétricos, que permiten la producción de un mapa a partir de fotografías aéreas y puntos de control geodésicos (Robinson et al., 1987).

c) Métodos automáticos

El uso de los sensores aerotransportados y los GPS (Sistemas de Posicionamiento Global) permiten registrar en soporte digital la altitud en diferentes puntos del terreno. Los sensores aerotransportados calculan la altitud de un avión sobre el terreno, de modo que con el avance del avión se almacena la energía del terreno, si bien con cierta distorsión producida por el instrumento de medición. De especial utilidad resulta el GPS por su mayor precisión en la localización.

En el mejor de los casos, el usuario dispone de un fichero digital original, en formato vectorial, del que puede tomar la información directamente, por lo que la fase de captura de datos se obviaría.

 ¿Qué importancia tienen las curvas de nivel en la generación de un MDE? Las curvas de nivel son el tipo de elemento básico para la construcción del MDE y su calidad está directamente relacionada con la escala de captura de datos. Resuelven sin dificultad la representación de áreas con cierta energía del relieve, pero presentan algunas limitaciones

cuando se trata de representar áreas llanas, fondos de valle o alineaciones de cumbres (cordales). En estos casos, el protagonismo se traslada a los puntos de cota, gracias a los cuales es posible definir superficies llanas y una gran parte de las microformas topográficas presentes en el territorio (picos, depresiones, collados, etc.).

Figura 1. Visualización de curvas de nivel y puntos-altimetría sobre la Ortofoto al sur de la Bahía de Santander



Fuente: Gobierno de Cantabria, Ortofoto e IGN, Mapa Topográfico Nacional 1:25.000. Elaboración propia.

 Buena parte de los programas SIG no permiten combinar en un mismo fichero datos de tipo puntual (los puntos acotados) y de tipo lineal (las curvas de nivel). Descansa en el usuario la decisión final acerca de qué tipo de fichero resuelve mejor la información altimétrica: un fichero de líneas limita los datos de partida a los contenidos en las curvas de nivel, mientras que un fichero de puntos permitirá incorporar simultáneamente curvas de nivel (traducidas a puntos) y puntos de cota. En este último caso, es imprescindible que el usuario traduzca previamente el fichero de curvas en un fichero de puntos y lo fuse con el de cotas. El fichero vectorial resultante contendrá toda la información altimétrica, lo que redundará en una mejor definición del MDT.

Bloque 1.3. LA INTERPOLACIÓN ESPACIAL: DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Una vez obtenidos los datos altimétricos de partida, el problema central en la construcción de un MDE radica en el método numérico empleado para la conversión de los valores altitudinales conocidos para unidades discretas (curvas de nivel y/o puntos de cota) en una superficie continua e irregular. En este sentido cobra especial importancia el proceso de interpolación¹, del que podemos encontrar diferentes definiciones, pero con una esencia o filosofía conceptual muy semejante.

 La interpolación puede definirse como el proceso para la estimación de las propiedades de los sitios para los que no se dispone información en un ámbito en el que sí se conocen ciertas localizaciones que se han muestreado (Waters, 1989).

Según Comas y Ruiz (1993) la interpolación es el procedimiento empleado para predecir valores desconocidos de unas localizaciones geográficas, vecinas de otras localizaciones con valores conocidos. Esta definición enlaza con la llamada **Primera ley de la Geografía** (Tobler, 1959) por la que los puntos próximos en el espacio tienden a parecerse más (valores parecidos) que los que se encuentran alejados entre sí.

 En suma, la interpolación espacial, considerando los diferentes enfoques conceptuales posibles, implica las siguientes cuestiones (Giscampus.org):

- Considerar la **entidad espacial** (y modelado de datos) tanto de los valores observados como de los valores que se pretenden estimar.
- Considerar la **escala de medición** de la variable analizada.
- Determinar el grado de conocimiento del **comportamiento espacial** del fenómeno que se va a interpolar.
- Seleccionar el **método de interpolación adecuado** según la relación espacial de los objetos observados y estimados.

¹ Distintos métodos de interpolación espacial han sido propuestos hasta la fecha desde el campo de la Geoestadística (inverso ponderado de la distancia, *kriging*, el vecino más próximo, etc.), que ofrecen buenos resultados en la interpolación de otras variables distintas a las estrictamente topográficas.



El **método de interpolación** resulta elemental en el trabajo con SIG ya que permite completar información en aquellas áreas para las que no se dispone de datos del mundo real (Bosque, 1992). A pesar de que podemos hablar en abstracto del “método de interpolación” en realidad son diversos los métodos y técnicas que podemos aplicar para este proceso.

¿Cómo se clasifican los métodos de interpolación? Hay diversos sistemas de clasificación según el enfoque que analicemos:

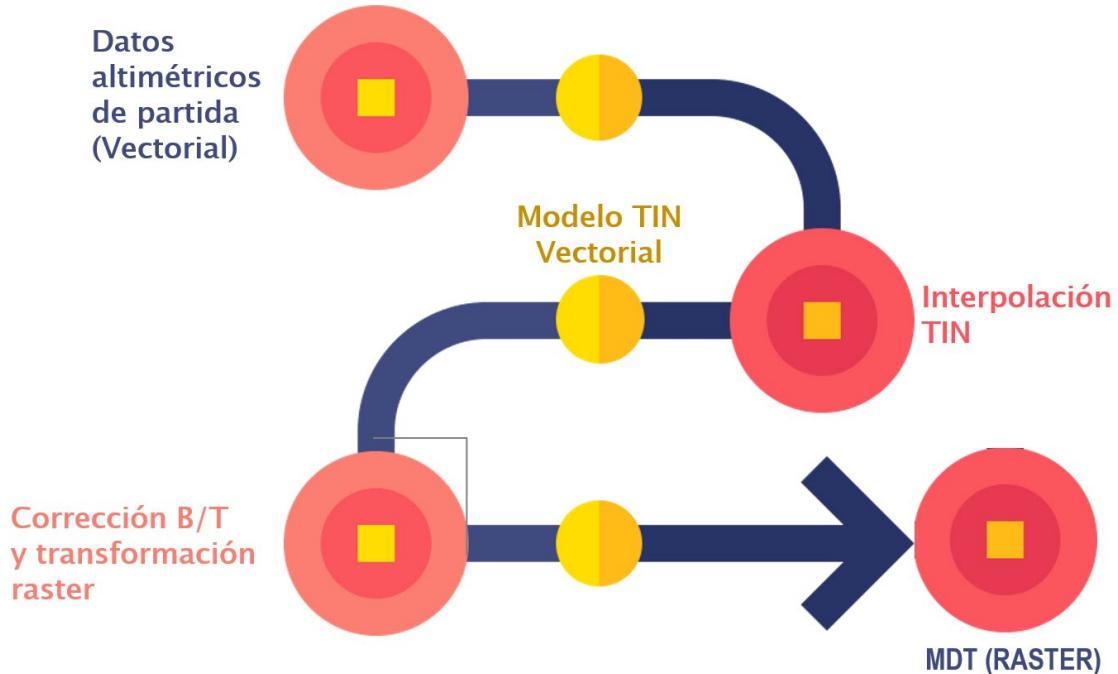
- **Globales o locales:** se consideran globales si aplican la misma función a todo el ámbito de estudio (tendencia general), mientras que los métodos locales se basan en aplicaciones de la función a grupos de puntos
- **Exactos o aproximados:** los exactos interpolan considerando todas las mediciones observadas de base (se consideran todas fiables y se mantienen sus valores iniciales) mientras que los aproximados derivan nuevos valores estimados para los puntos de referencia.
- **Graduales o abruptos:** los graduales generan una superficie interpolada en la que los valores van variando gradualmente a lo largo del ámbito analizado, mientras que los métodos de interpolación abruptos producen un resultado con rupturas categóricas en los valores, que da un efecto escalonado del tipo “áreas de influencia”.

Dado que existen métodos de interpolación muy diversos –generación de líneas, polígonos de Thiessen (áreas de influencia), krigging, etc.–, en este módulo se seleccionan y describen los que tienen especial importancia cuando la variable interpolada es la altitud de la zona de estudio, es decir, cuando lo que se pretende interpolar es un MDE.

Global 	Exacto 	Gradual
Local 	Aproximado 	Abrupto

Bloque 1.4. LA CREACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO BASADA EN LA INTERPOLACIÓN “TIN”

Figura 2. Pasos para generar MDT según método de interpolación TIN

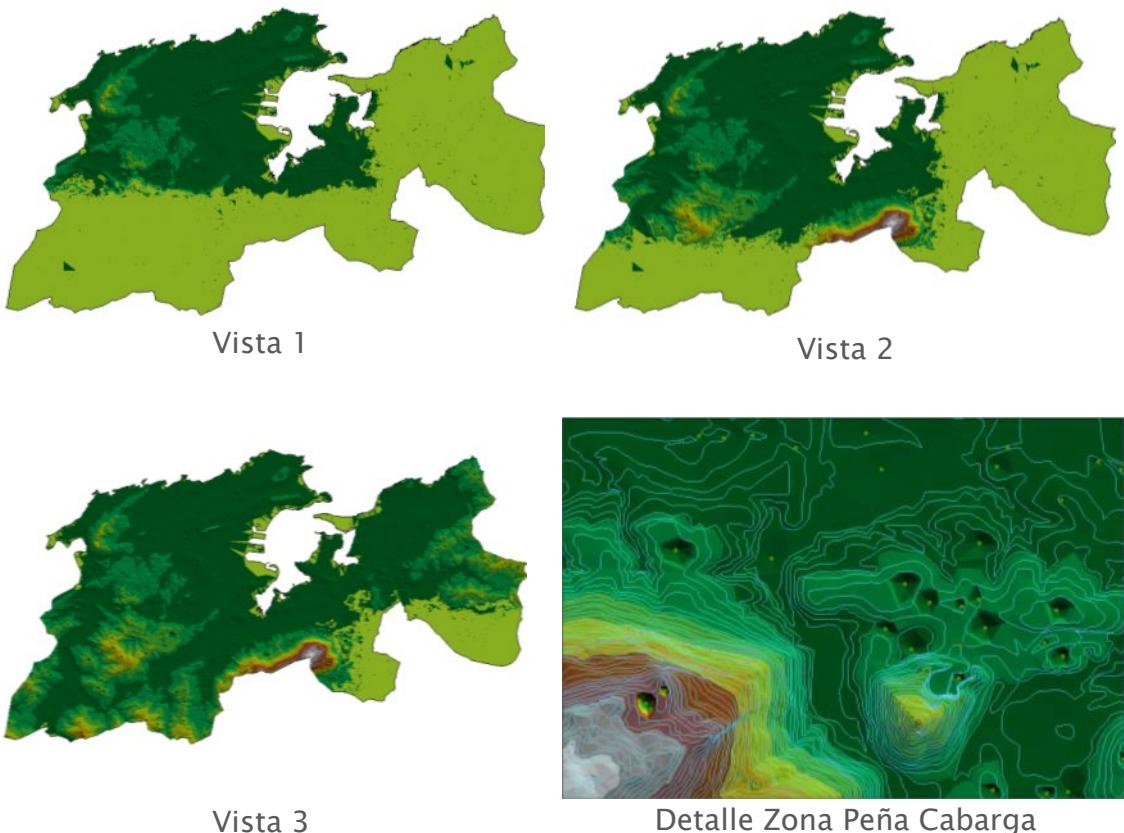


4.1. Fase 1: interpolación de un MDE mediante la construcción de una red irregular de triángulos

La modelización del terreno exige métodos de interpolación más exactos. Está generalmente aceptada la adecuación para la variable altitudinal de los modelos de redes de triángulos irregulares “*Triangulated Irregular Network, TIN*”. Procedentes del campo del Dibujo Asistido por Ordenador (CAD), este tipo de modelos vectoriales ofrecen una definición más exhaustiva de una superficie topográfica y son especialmente útiles en ámbitos con alta energía del relieve o topografía irregular.

Se trata de un **interpolador exacto** consistente en la conexión mediante líneas de los puntos observados con la consecuente construcción de triángulos. Con ello, **cada triángulo se delimita a partir de tres líneas y éstas a su vez están acotadas por dos vértices**. Esta estructura TIN aplicada a un MDE se interpreta del siguiente modo: los vértices son entidades del terreno (cumbres, fosas...) y las líneas representan valles, crestas, etc.

Figura 3. Detalle del proceso de visualización del TIN del área metropolitana de Santander



Estos modelos pueden generarse indistintamente a partir de ficheros de puntos o de ficheros de curvas. El proceso de interpolación TIN genera la red de triángulos por dos vías posibles:

- La triangulación constreñida de Delaunay
 - La triangulación no constreñida.

a) El método constreñido: la triangulación de Delaunay

El método constreñido implica que ninguno de los bordes de los triángulos resultantes cruce alguna de las curvas de nivel originales, es decir, cada triángulo se extiende en el espacio comprendido entre dos isolíneas y tiene sus vértices en ellas. De este modo, el método asegura que la triangulación es consistente con los datos de partida.

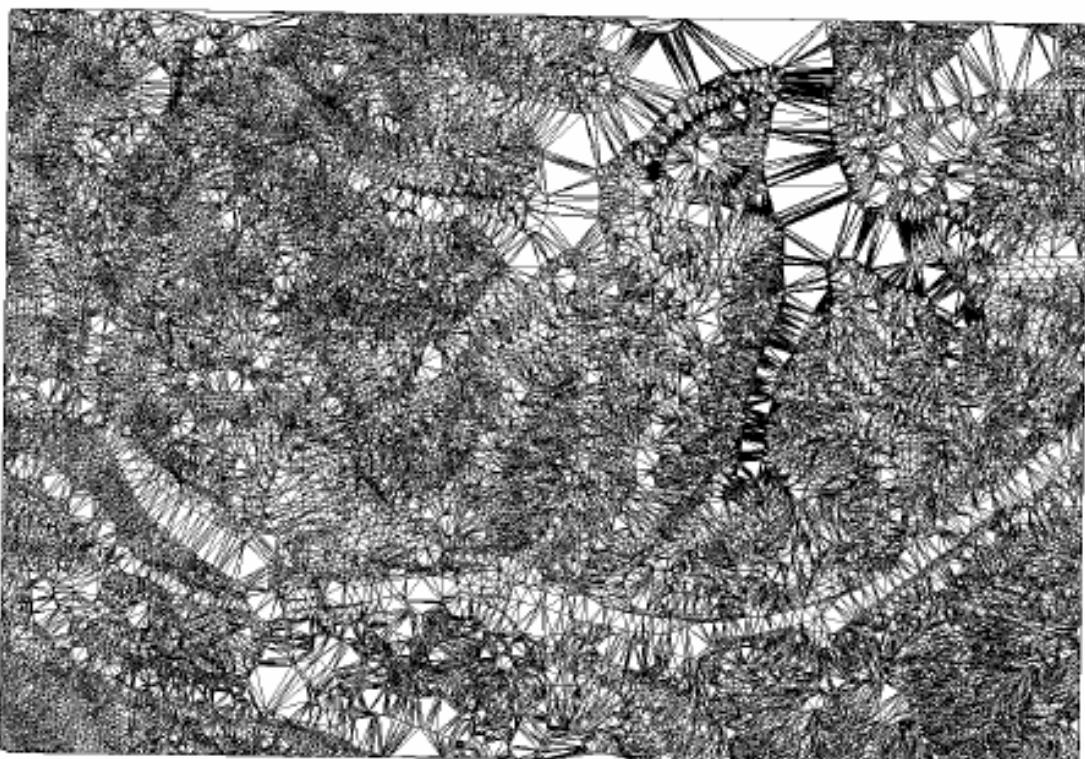
La triangulación de Delaunay es empleada frecuentemente en la modelización triangular y se define por tres criterios:

- Un círculo que pase por los tres puntos de cualquier triángulo no puede contener ningún otro punto en su interior
- Los triángulos no pueden solaparse
- No hay huecos vacíos en la red de triángulos resultante.

b) El método no constreñido

El método no constreñido para mejorar la velocidad de ejecución del proceso interpolador: los datos de partida son divididos en secciones, cada una de las cuales es interpolada. Una vez finalizado el proceso, los modelos parciales son unidos.

Figura 4. Vista en planta de un modelo TIN



4.2. Fase 2: la optimización del modelo mediante el método B/T

Ya se ha señalado cómo la información que proporcionan las curvas de nivel no tiene la suficiente calidad en términos de una correcta definición del MDT. La ausencia de datos en determinadas áreas, como pueden ser las cumbres o los fondos de valle, produce zonas de vacío en las que la curva de nivel no es suficiente para definir su morfología.

En el campo de los MDT vectoriales diversas soluciones se han propuesto para solucionar estas indefiniciones. La más común consiste en

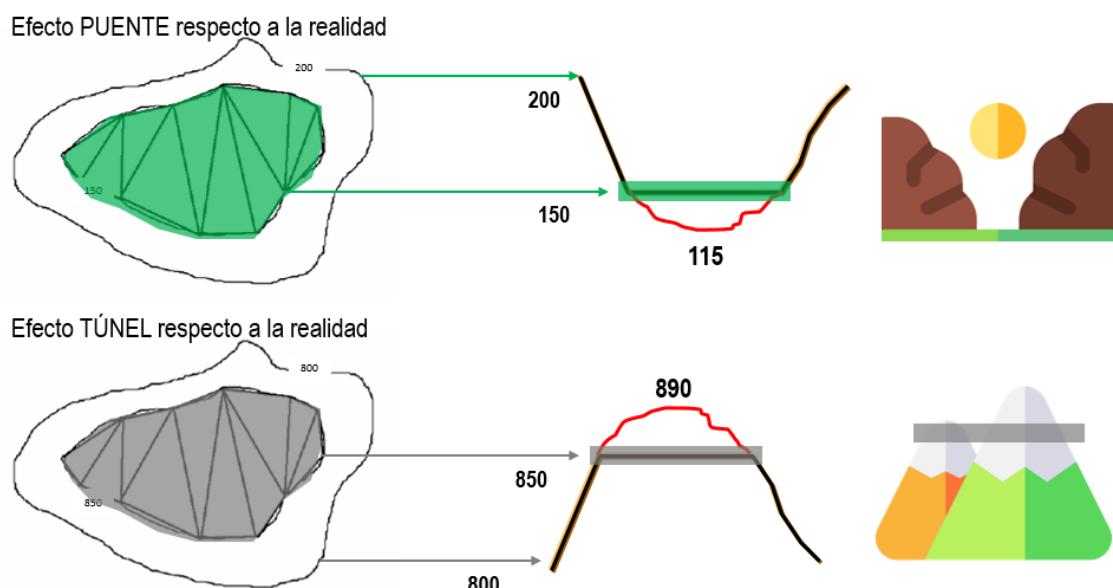
incorporar a la información de las curvas los puntos de cota presentes en el mapa, lo que soluciona parcialmente los problemas en las cumbres (generalmente bien acotadas) y no tanto en los fondos de valle. Uno de los correctores destacados en la generación de MDT a partir de datos vectoriales son las correcciones B/T apoyadas en los puntos críticos, cuestiones que se explican a continuación.

a) Los bordes B/T (Bridge & Tunnel)

Los efectos (defectos) denominados “bordes puente y túnel” (Bridge & Tunnel edges, B/T) suponen artificios del modelo TIN en aquellas zonas donde las curvas de nivel no definen con la suficiente precisión la topografía real. Estas imprecisiones se localizan, frecuentemente, en las cumbres y en los fondos de valle, en donde los triángulos del modelo TIN dibujan falsas superficies llanas.

 Los bordes B/T se definen como aquellos lados de un triángulo cuyos vértices tienen la misma cota, pero que no son puntos vecinos en la curva de nivel sobre la que se apoyan; con ello, estos “defectos” consisten en límites de triángulos que pasan por encima o por debajo (respectivamente) de la superficie real.

Figura 4. Ilustración gráfica del efecto de puente y túnel



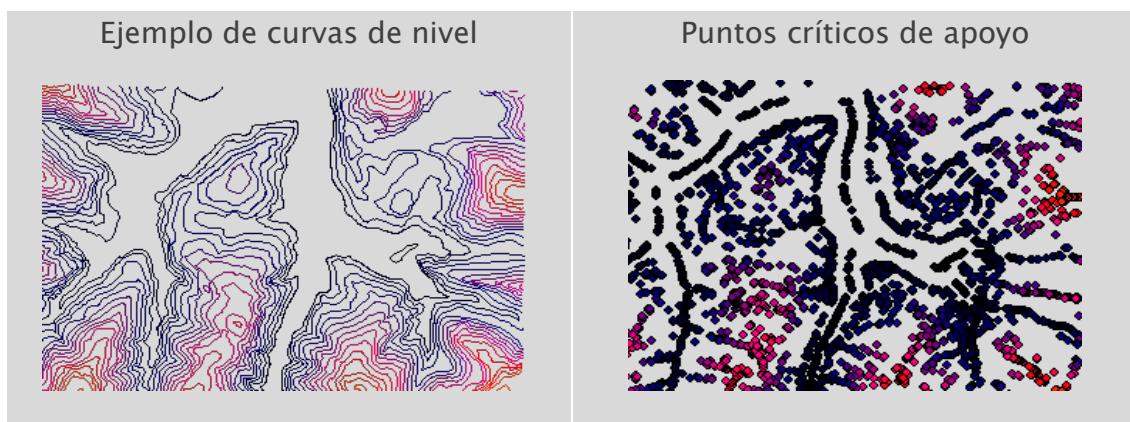
En la Fig. 4 se dibujan una serie de triángulos en dos zonas: una de valle y otra de cumbre. Todos los vértices enlazan con una sola curva de nivel

y por lo tanto tienen la misma cota. El resultado es una falsa zona llana derivada de la ausencia de otras curvas o puntos acotados en el mapa original. Los lados de estos triángulos deben ser considerados como bordes de puente en el primer ejemplo y bordes de túnel en el segundo.

b) Los puntos críticos

Una vez completada la identificación de los bordes B/T **se generan nuevos puntos (denominados puntos críticos)** en el punto intermedio de cada borde B/T. Estos nuevos vértices se incorporan a las curvas de nivel originales para resolver los artificios B/T y se procede a un nuevo cálculo de la red TIN.

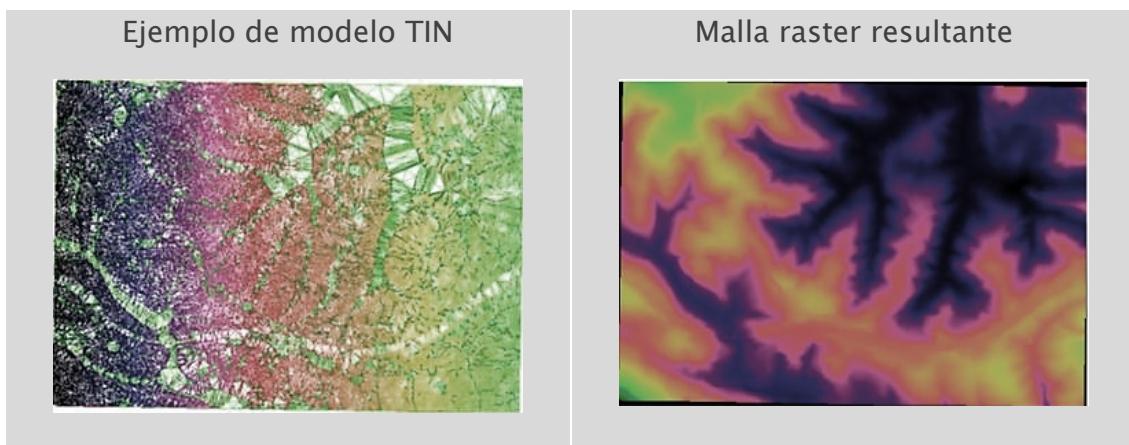
El valor altitudinal de cada uno de estos nuevos puntos se interpola a partir de las ocho direcciones principales, empleando las altitudes de las curvas de nivel cercanas. El valor final asignado a cada punto crítico es la media de los valores interpolados en todas las direcciones válidas.



4.3. Fase 3: transformación de la red de triángulos en una malla raster

Aunque el modelo TIN puede considerarse como un Modelo Digital de Elevaciones, por su complejidad geométrica y exigencias de computación, parte de las aplicaciones SIG se limitan a visualizar los datos, sin entrar en su análisis. Es necesario traducir la información a una estructura raster para asegurar la completa funcionalidad del modelo, ya que es bajo estas estructuras matriciales donde se han desarrollado la mayor parte de los procedimientos computerizados, o herramientas, para el análisis de superficies (cálculos de pendiente, orientación, modelización hidrológica, cuencas de visibilidad, etc.).

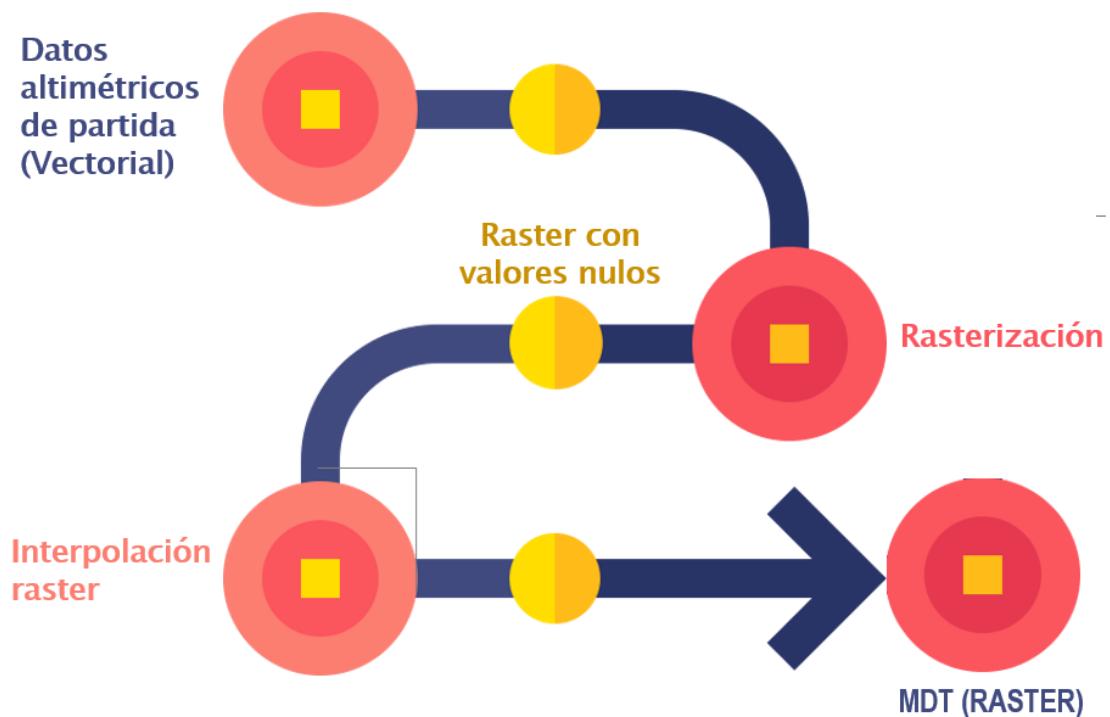
La traducción del modelo TIN a formato matricial (raster) implica una nueva interpolación, dado que para cada celda de la matriz se debe calcular su correspondiente valor altitudinal.



Bloque 1.5. LA CREACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO BASADA EN LA INTERPOLACIÓN RASTER

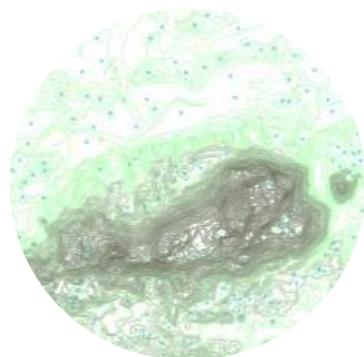
Esta metodología parte de la rasterización como paso inicial y a partir de ese nivel se desarrollan los siguientes pasos en modelo raster. Las fases son: rasterización e interpolación raster

Figura 5. Pasos para generar MDT según método de interpolación raster



5.1. Fase 1: rasterización de los datos altimétricos vectoriales de partida

En este procedimiento de creación de modelos digitales del terreno la primera fase consiste en la **transformación de los datos vectoriales de partida en raster**, lo que se denomina **rasterización**. En este caso, se trata de la rasterización de un vectorial de líneas que contiene valores de altitud, como el vectorial de curvas de nivel.



Todos los espacios vacíos en el vectorial de curvas de nivel son lugares en los que se desconoce el valor altitudinal, mientras que el recorrido de cada curva corresponde con un valor determinado de altitud que el vectorial llevará asociado en un campo de la tabla de atributos que le acompaña.

Esto es importante ya que en el proceso de rasterización **se debe elegir ese campo que contiene el valor de altitud como variable a rasterizar**; de este modo, el nuevo mapa raster contendrá en cada celda el valor de altitud correspondiente a la curva que espacialmente coincide con la ubicación de ese pixel, mientras que las celdas que no coincidan con curvas de nivel asumirán un valor teórico que será interpretado como “vacío” (por ejemplo, -99999).

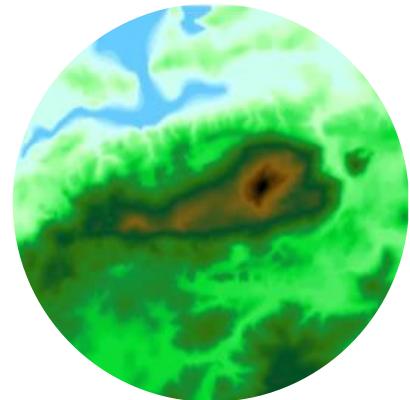
5.2. Fase 2: interpolación raster

Recordemos la definición propuesta por Comas y Ruiz (1993) para la interpolación como el procedimiento empleado para predecir valores desconocidos de unas localizaciones geográficas, vecinas de otras localizaciones con valores conocidos. Según este concepto, las localizaciones geográficas en este proceso de creación de un MDE corresponderían a las diferentes celdas o pixeles del raster procedente de rasterizar las curvas de nivel.

En este raster los valores conocidos son las celdas que cuentan con el valor de altitud marcado por la curva de nivel original coincidente, mientras que la interpolación cobra especial protagonismo en las celdas

que quedaron en la rasterización vacías y que funcionan por tanto como celdas de “valores desconocidos”.

La interpolación genera una nueva capa raster correspondiente a una variable continua (altitudes) en la que cada pixel cuenta con un valor concreto de altitud.



UNIDAD 2: ANÁLISIS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES

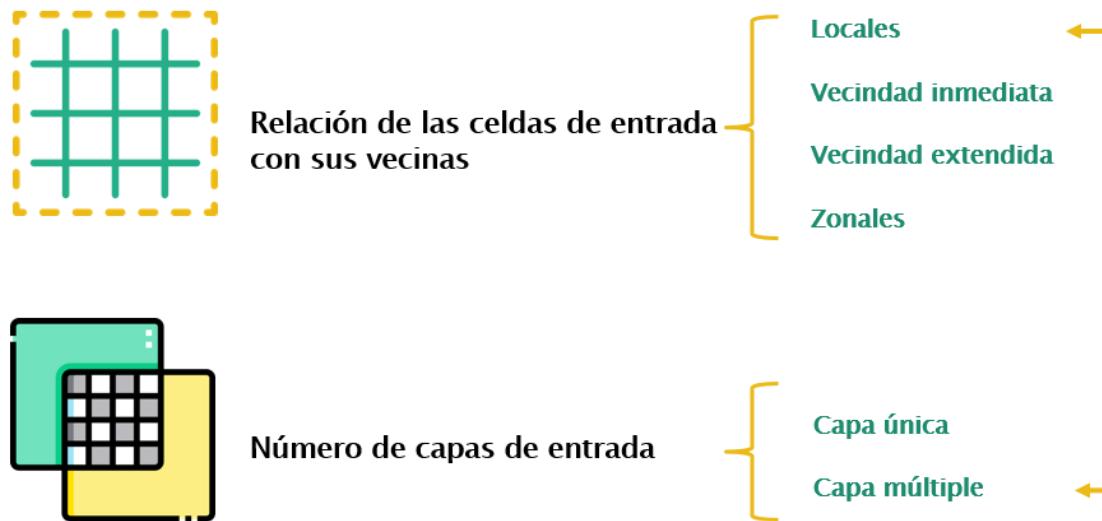


Bloque 0. INTRODUCCIÓN: LA CLASIFICACIÓN DE LAS OPERACIONES ESPACIALES CON UN SIG RASTER

En esta unidad del Tema 3 comienza el desarrollo de las operaciones de análisis espacial mediante SIG en entorno raster; por ello, es importante aclarar inicialmente **cuáles son los sistemas o criterios de clasificación de las operaciones espaciales raster** que se estudiarán en el presente tema y en los sucesivos.

Se toman como referencia **dos sistemas o criterios de clasificación**, que no son excluyentes, sino que se complementan: la **situación de las celdas** que intervienen en el resultado de la operación espacial (Gould y Gutiérrez-Puebla, 1994) y también el **número de capas** necesarias para aplicar una determinada operación espacial.

Figura 1. Criterios de clasificación de las operaciones espaciales SIG raster



 Según el primer criterio señalado, la posición de las celdas de referencia, o la relación entre las celdas de entrada, M. Gould y J. Gutiérrez-Puebla (1994) señalaron cuatro tipos de operaciones: locales, de vecindad inmediata, de vecindad extendida y, finalmente, zonales.

 Fíjate, esta clasificación va de lo más cercano a la celda a lo más alejado.

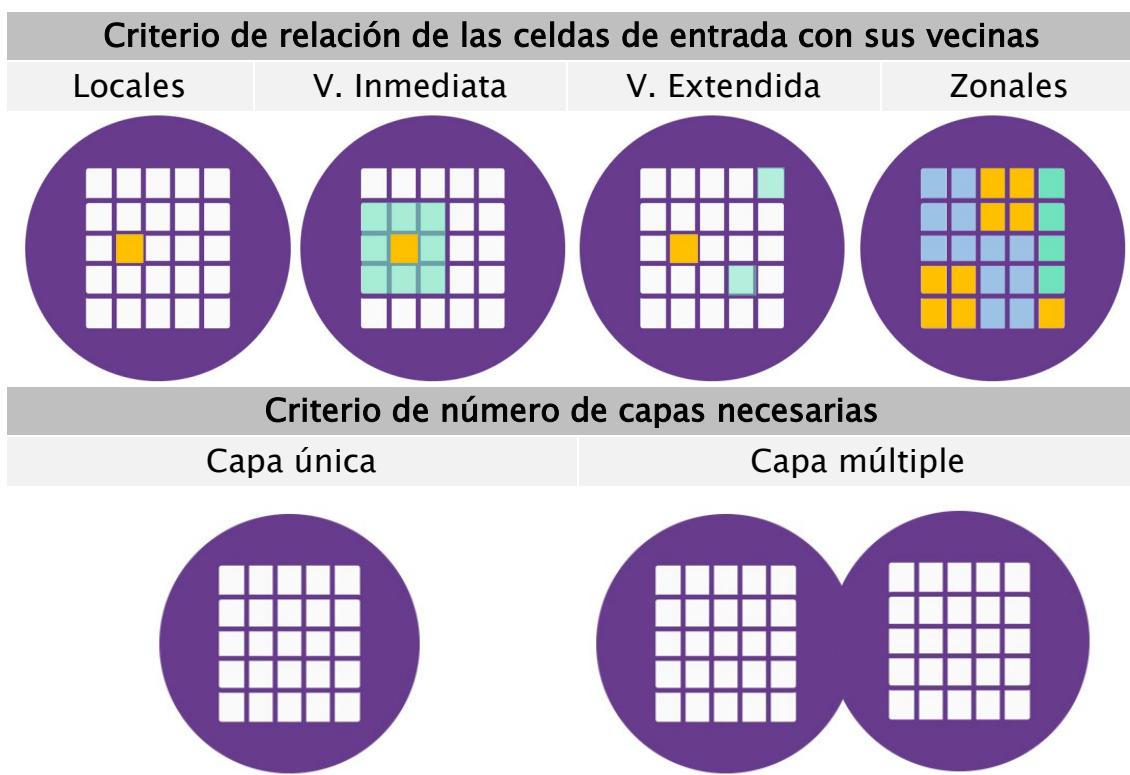
- **Locales:** operaciones en las que el resultado obtenido en cada pixel depende únicamente del valor que ese píxel tuviese en la capa de entrada (variable de partida), de modo que este tipo de operaciones no tienen en cuenta la relación de los valores de las celdas de referencia con sus vecinas.
- **Vecindad inmediata:** operaciones en las que el resultado obtenido en cada pixel depende no sólo del valor de la celda en cuestión, sino que también participan en la operación los valores de las celdas vecinas inmediatas (contiguas a la de referencia), es decir, que limitan por el lado y/o vértice.
- **Vecindad extendida:** operaciones en las que el resultado obtenido en cada pixel procede de la relación de cada celda dada con otra u otras que no tienen por qué estar contiguas a ella, sino que se localizan en cualquier parte de la capa analizada.
- **Zonales:** operaciones en las que los resultados obtenidos dependen de las zonas de partida, es decir, de los pixels que toman un mismo valor temático. Una aclaración: aunque se denominan zonales, en realidad se refieren a las clases (no a las zonas). Puedes repasar estos conceptos en el Tema 1.

Según el número de capas que son necesarias para una operación de análisis espacial raster, se distinguen operaciones: de capa única y de capa múltiple.

- **Capa única:** operaciones en las interviene una sola variable (mapa) de base para obtener un determinado resultado.
- **Capa múltiple:** operaciones en las que intervienen dos o más variables (mapas) de base para obtener un determinado resultado.

Figura 1. Criterios de clasificación de las operaciones espaciales SIG raster

Figura 2. Esquema gráfico de los tipos de operaciones



Según la combinación de ambos tipos de criterios de clasificación, es posible establecer una tipología completa de las operaciones espaciales que se trabajan en este curso.

Esto es aplicable a todas las operaciones espaciales, independientemente de la temática concreta que se analice (como en este tema, el análisis de modelos digitales de elevaciones).

 No obstante, es importante tener en cuenta que **el criterio de número de capas puede variar sensiblemente de unos programas SIG a otros**; así, en ciertos análisis podemos encontrarnos con que algunos sistemas piden el elemento de referencia cartografiado (capa), mientras que en otros es suficiente con incorporar los valores numéricos de las coordenadas, con lo cual el número de capas necesarias para calcular esa operación podría ser distinto según el programa que se use.

Bloque 2.1. EL MDT COMO ELEMENTO EN COMÚN DE OPERACIONES ESPACIALES DE DIVERSO TIPO

 Todas las operaciones espaciales que se presentan en esta unidad del Tema 3 tienen en común que en ellas la capa de entrada (la variable de partida) debe necesariamente ser la altitud de la zona de estudio modelizada en raster, es decir, son operaciones que parten de un modelo digital de elevaciones (MDE).



Se trata, por tanto, de una selección de operaciones que permiten en cierto modo parametrizar el relieve (Felicísimo, M.A.); es decir, realizar una serie de operaciones espaciales que tienen por objeto definir las características geométricas del relieve.



Entre este tipo de operaciones posibles la más extendida es el análisis de la pendiente, a la que se une con frecuencia el estudio de las orientaciones.



En este tema cobra especial protagonismo la funcionalidad del MDE para otras operaciones, tales como: el análisis de visibilidad, la intervisibilidad e impacto visual, así como el estudio del drenaje y operaciones hidrológicas.

Además, los programas SIG incorporan otras potencialidades para la presentación de información, que también se relacionan con la variable de altitud (MDE), tales como: perfiles topográficos, vistas 3-D, mapas de sombras, etc. Estas cuestiones se abordarán en las prácticas del tema.

Bloque 2.2. ANÁLISIS DE PENDIENTES EN UN SIG RASTER

El análisis de las pendientes en un SIG raster consiste en una adaptación del cálculo conocido de la pendiente por métodos convencionales. Por ello, resulta interesante comenzar el estudio de análisis de pendientes SIG recordando este concepto genérico:

 **Slope (Pendiente):** Parámetro morfométrico que expresa la inclinación del terreno con respecto al plano horizontal. Se calcula relacionando la distancia vertical entre dos puntos, deducible a partir de

las curvas de nivel y la distancia horizontal. El valor de la pendiente puede expresarse como fracción (tantos por uno), porcentaje o en grados (GONZÁLEZ AGUAYO, R.: Diccionario de términos SIG).

🔍 La pendiente se interpreta de forma sencilla como el **desnivel altitudinal entre dos puntos, en relación a la distancia que los separa**; con ello, a igual desnivel altitudinal entre los Puntos A y B y los Puntos A y C la pendiente será mayor cuanto menor sea la distancia (denominador del cálculo) que separa esos puntos considerados.

La pendiente es inversamente proporcional a la distancia que separa los puntos de referencia tomados.

Figura 3. Comportamiento de la pendiente según la distancia



Si se toma como referencia el concepto de pendiente, su adaptación al cálculo SIG parte de registrar la variación de altitud entre dos puntos que, en este caso, son los **centroides de pixel**, con relación a la distancia que los separa, que se identifica como la distancia entre esos centroides.

⭐ El análisis de la pendiente en un SIG raster es una operación de **vecindad inmediata** -interviene la celda en cuestión y las vecinas que limitan por el lado y/o vértice- y de **capa única** -sólo con la información relativa a las altitudes es posible generar las pendientes-.

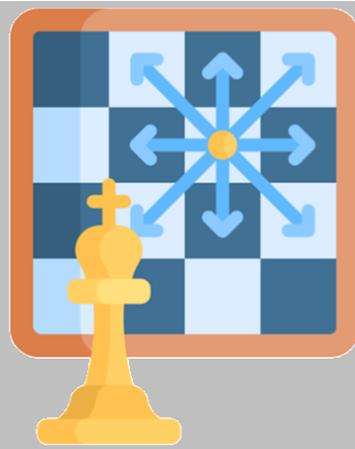
KNIGHT: En el cálculo de la pendiente de cada celda de un MDT de partida intervienen los desniveles altitudinales entre la celda de referencia y sus vecinas, por el lado (movimiento de la torre) o bien por el lado y el vértice (movimiento del rey).



Movimiento de la torre en una malla raster

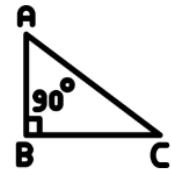


Movimiento del rey en una malla raster



En un programa SIG que responda al movimiento de la torre, el análisis de pendiente se basa en los cálculos de pendiente con las 4 celdas vecinas por el lado. En esos casos, el denominador del cálculo de pendiente es la distancia directa (= lado de pixel), mientras que en los programas SIG que se basan en el movimiento del rey, las pendientes no sólo se calculan con las 4 celdas vecinas por el lado, sino también con las otras 4 vecinas en diagonal (por el vértice).

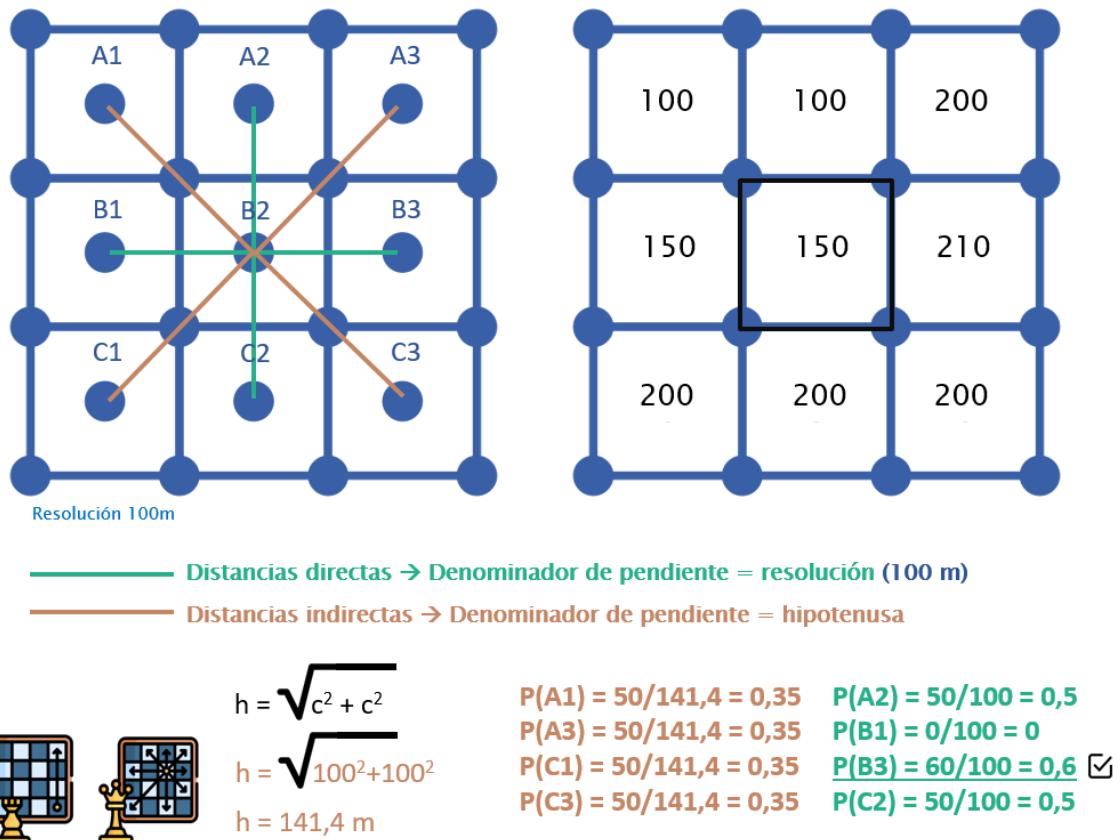
Esas distancias en diagonal para el denominador corresponden a la distancia indirecta, que se calcula a partir del Teorema de Pitágoras, considerando los catetos igual a la resolución (A-B y B-C) y despejando la hipotenusa (A-C).



De los 4 o, en su caso, 8 cálculos de pendientes entre cada celda y sus vecinas el mapa de pendientes resultante asume en cada celda un único valor que puede ser asignado en función de diferentes métodos, entre los que destaca el de la “máxima pendiente” según el cual en el mapa resultante se muestra únicamente el máximo valor de pendiente obtenido tras los cálculos detallados de vecindad inmediata.

Con ello, los SIG raster calculan la pendiente que hay entre de cada pixel y sus vecinos; otorgando en el mapa de pendientes resultante, a la celda central el mayor valor de pendiente obtenido, por tanto, representa el **gradiente**.

Figura 4. Esquema de cálculo de la pendiente en una malla raster según el movimiento de la torre y el movimiento del rey

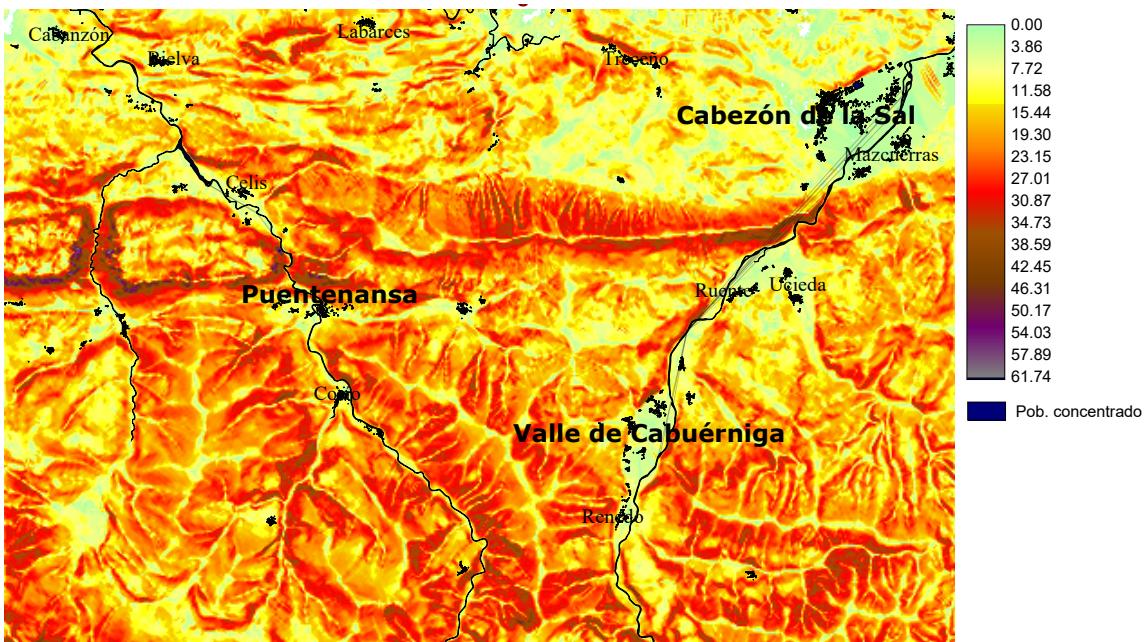


El resultado de la Fig. 4 está expresado en tantos por uno, aunque podría expresarse en diferentes unidades, siendo las más utilizadas en los programas SIG grados (ángulo formado entre el plano inclinado y horizontal) y porcentaje².

² Un valor de pendiente del 100% se corresponde con un ángulo de 45 grados ya que el desnivel altitudinal (Y) y la distancia horizontal (X) de un ángulo de 45 grados coinciden y al dividirlos da como resultado 1 que si se multiplica por 100 es igual a una pendiente del 100%: por cada metro que se avanza en sentido horizontal se asciende un metro.

<http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/AnalisisTerreno/DEMModule/DEMTheory.doc>

Figura 5. Ejemplo de mapa de pendientes en la Hoja de Cabezón de la Sal H57
MTN (grados)



Bloque 2.3. ANÁLISIS DE ORIENTACIONES EN UN SIG RASTER

Como orientación se identifica la dirección que toma cada una de las celdas, consideradas planos inclinados³.



Dado que el análisis de la orientación se puede estimar tomando como referencia únicamente el MDE, se trata de una operación espacial de capa única y, dado que intervienen las celdas contiguas a la de referencia, se considera una operación espacial de vecindad inmediata.

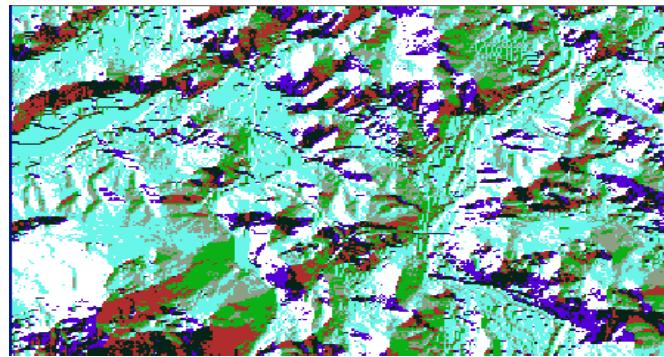
Inicialmente, la orientación a partir de la rosa de los vientos se puede expresar en términos cualitativos o bien cuantitativos. En el caso de los mapas de orientaciones generados con un SIG los valores de orientaciones se expresan de forma numérica, en grados azimut (360° a partir del Norte que es 0°); de este modo, los píxeles con valores de 0° y



³ Según la definición de A.M. Felicísimo “la orientación en un punto puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto”. FELICÍSIMO, A.M.: Introducción a los modelos digitales del terreno.

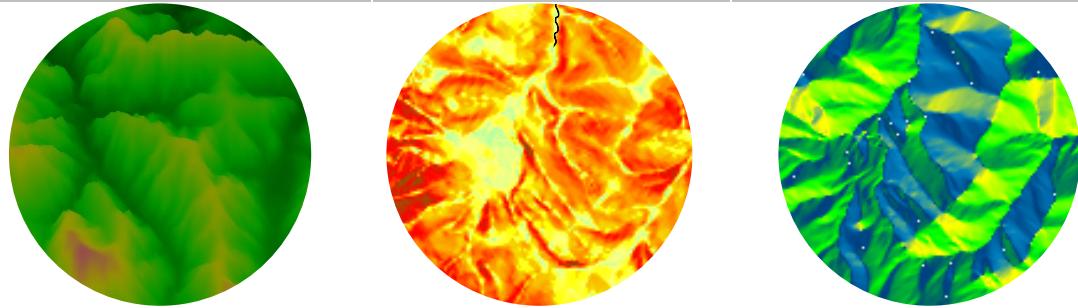
360° son semejantes (orientados hacia el norte). En grados, la correspondencia del rango numérico con la interpretación cualitativa es la siguiente:

- 45° Noreste
- 90° Este
- 135° Sureste
- 180° Sur
- 225° Suroeste
- 270° Oeste
- 315° Noroeste
- 360° ó 0° Norte



Los píxeles llanos, de pendiente 0, normalmente son tratados de forma especial por los SIG en el cálculo del mapa de orientaciones y con frecuencia no toman ninguna orientación concreta –y todas a la vez– en el modelo de orientaciones generado, asumiendo un valor que se sale del rango lógico de los grados de orientación señalados anteriormente. Este valor correspondiente a todas las orientaciones es anómalo en relación a los grados de orientación (rango 0–360) y pueden aparecer con el valor –1, o bien el nulo –99999 (dependiendo de los programas usados).

Desnivel altitudinal	Pendiente	Orientación
0 m	0 grados	Nula (–1, –99999, etc.)



Bloque 2.4. ANÁLISIS DE VISIBILIDAD

A partir de un MDT un SIG con potencialidad de análisis raster es capaz de realizar análisis de visibilidad y, en definitiva, **identificar si entre dos celdas existe conexión visual**. Uno de los cálculos de visibilidad más extendidos es el de la **cuenca de visibilidad**, al que se une el **horizonte visual** como versión genérica y menos detallada del mismo.

4.1. Cálculo de cuencas de visibilidad

 La cuenca de visibilidad permite identificar el conjunto de localizaciones que se pueden divisar desde una posición concreta. Así se puede definir como el “conjunto de puntos del terreno que son visibles desde un punto de vista o foco”⁴.

 Se trata de una operación espacial de vecindad extendida (analiza toda la superficie de referencia) y según el software SIG utilizado puede encontrarse en versiones de capa única o de capa múltiple.

La generación de cuencas de visibilidad permite realizar estudios de impacto visual, así tienen una **doble interpretación**:

- identificar lo que se puede ver desde una posición (visor o emisor/receptor con función receptora) pero, también,
- conocer desde dónde se ve un determinado elemento si se ubica en cierto punto del territorio (visor con función de emisor).

Por ello, el estudio de cuencas visuales puede ser determinante en la búsqueda de localizaciones óptimas de nuevas instalaciones o construcciones cuando minimizar el impacto visual sea importante.

A pesar de poder plantear análisis de visibilidad proporcionales, centraremos este apartado en las cuencas de visibilidad booleanas; es decir aquellas en las que se obtiene un resultado de 0 y 1 en el cual todas las celdas que asumen el valor 1 forman parte de la cuenca visual.

 La doble interpretación de los estudios de cuencas de visibilidad –lo que se ve desde una posición o desde donde se ve una posición, es decir, su impacto visual– se asemeja al concepto de **intervisibilidad**.

Se ha señalado que el análisis de visibilidad es una operación espacial ligada directamente al MDE (es una variable imprescindible para el análisis de visibilidad).

⁴ FELICÍSIMO, A.M. *Glosario de términos usados en el trabajo con sistemas de información geográfica*. En: www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/glosario.pdf

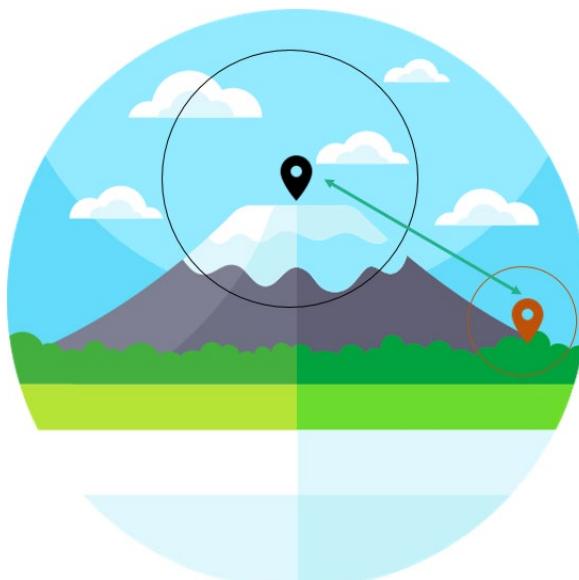
Además del MDT es necesario incorporar la localización desde la que se calcula la cuenca visual, lo que es denominado “emisor/receptor” y que actúa como visor.

Algunos programas SIG exigen que el visor esté cartografiado (lo que hace a la operación de capa múltiple) o bien, es suficiente con indicar las coordenadas (variante de la operación de capa única).

Hecha esta aclaración, a continuación, se muestran cuáles son las capas/parámetros que intervienen necesariamente en el cálculo:

- Para el análisis de visibilidad **es necesario disponer del modelo digital de elevaciones** de la zona para la que se realiza el análisis de visibilidad.
- Es imprescindible contar con la **localización concreta del emisor/receptor** sobre el terreno a partir de sus coordenadas X,Y.
- Otro elemento (parámetro), que interviene directamente en el modelo de visibilidad es la altura del emisor/receptor. Esta altura se añade a la altura que el MDE indique en su posición. Es decir, un visor de 5m localizado en un pixel de 200 m de altitud hace que la estimación de la cuenca de visibilidad se calcule desde una posición de 205 metros de altura. Debe expresarse en las unidades de documentación de la capa.
- Finalmente, es importante indicar el radio de alcance, parámetro con el que es posible acotar el análisis de visibilidad a un sector del ámbito de estudio.

De este modo, se analiza desde una determinada posición (emisor/receptor) las celdas que son visibles en función de la altitud (MDE) y de la propia altura del emisor/receptor a lo largo de una superficie de radio x desde el emisor/receptor.

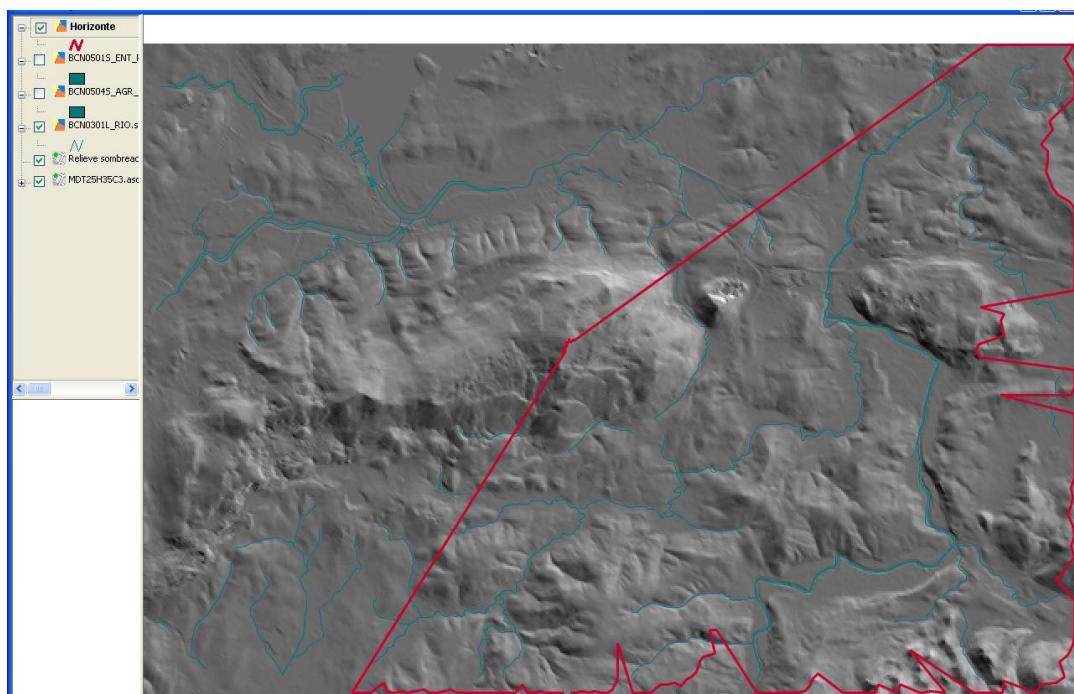


En caso de que se quiera que el área de análisis de visibilidad cubra todo el mapa se puede indicar como radio de búsqueda la longitud de la diagonal del mapa (máxima distancia posible si el visor estuviese en una esquina).

4.2. Cálculo del horizonte visual

Estima a partir del MDT el borde exterior de una cuenca de visibilidad desde un emisor/receptor, generando un vectorial que perfila el contorno u horizonte máximo de una cuenca visual, incluyendo por tanto zonas de sombra del análisis de visibilidad.

Figura 6. Ejemplo de resultado de horizonte visual (línea roja)



Bloque 2.5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

En Geografía es muy frecuente la realización de análisis hidrológicos diversos en una determinada zona de estudio; por ello, es habitual que los programas SIG incorporen un potente módulo con varias operaciones espaciales orientadas a tal fin. Estas operaciones pueden variar de unos sistemas a otros (cálculo de cuenca de drenaje, acumulación de flujo, red de drenaje, orden de Strahler, etc.), por lo que nos centraremos en algunas de las que suelen estar más generalizadas.

5.1. Cálculo de las cuencas de drenaje

Por cuenca de drenaje (o cuenca vertiente) se entiende el **conjunto de puntos del terreno cuyas líneas de flujo convergen en un sumidero, que suele hacerse coincidir con un punto singular**: una desembocadura o una confluencia de ríos, etc. (Felicísimo, M. A.). Con ello, el estudio de drenaje con un SIG raster permite estimar a partir de las altitudes (e internamente en función de las orientaciones) el conjunto de píxeles que vierten sus aguas a un elemento común.

Derivado de ello se puede calcular, por ejemplo, el tamaño de la cuenca de recepción para cada pixel, es decir, el número de celdas que (incluida la de referencia) vierten sus aguas hacia cada pixel tomado de referencia.

 Se trata de una operación espacial de **vecindad inmediata**⁵ y puede presentarse en variante de **capa única o de capa múltiple**, según los objetivos del análisis de drenaje y según el programa SIG empleado.

En cualquier caso, todo análisis de cuencas vertientes incorpora como capa de entrada imprescindible un MDE. Cierto problema en el algoritmo de análisis de drenaje aparece cuando el MDE de contamos con la presencia de pozos (depresiones locales o mínimos relativos), lo que necesariamente debe contar con un tratamiento específico para corregirlo antes de iniciar el cálculo de cuencas vertientes o cualquier otro análisis hidrológico.

Este tratamiento de corrección consiste en “**eliminar fosas o depresiones**”, entendidas éstas a nivel local (de pixel) con el fin de si existiese una depresión local esta sería eliminada la altitud del pixel en el MDE original a la mínima altitud existente en las vecinas inmediatas.

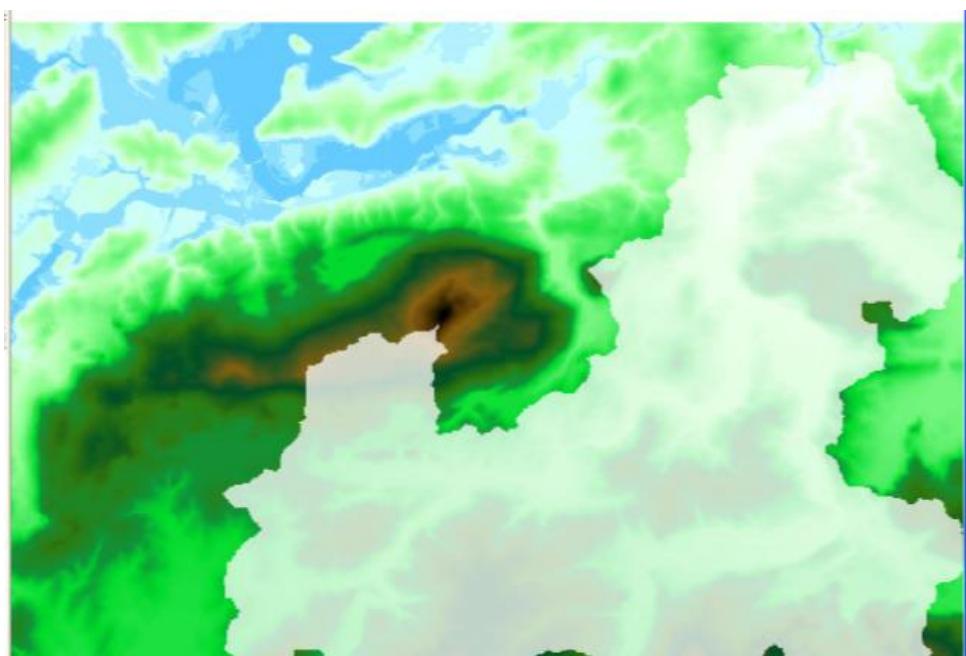
⁵ Gould y Puebla describieron el proceso de cálculo como “*la determinación de hacia qué celda de las ocho vecinas vierte el agua de lluvia que cae sobre una celda dada*”. Sirva de ejemplo: si la orientación de la celda es sur, la escorrentía se dirigirá hacia la limítrofe al sur. Bosque Sendra señaló en su libro *Sistemas de Información Geográfica*, a modo de ejemplo, lo siguiente: “*un pixel podrá recibir flujos del pixel vecino situado al noroeste si la orientación de ese lugar está entre 90 y 180°, es decir, si está orientado hacia el este, o el sureste, o el sur, o situaciones intermedias entre éstas*” (p.407).

Situaciones que alteran el modelo de drenaje

Celdas planas sin orientación concreta	Fosas o depresiones
Sustitución automática por el promedio de celdas limítrofes	Corrección previa de las fossa mediante eliminar depresiones

Es frecuente que en un estudio de drenaje interese conocer las celdas que vierten sus aguas a un determinado pozo, desembocadura, etc. Es decir, que se calculan a partir de un punto de referencia. En este caso se precisaría disponer del MDT corregido sin depresiones y la identificación de un par de coordenadas X,Y que actuaría como referencia para estimar la cuenca aguas arriba.

Figura 7. Ejemplo de cuenca vertiente a un punto en la Hoja 35 – Cuadrante 3



En suma, esta operación de análisis de cuencas vertientes puede presentar diferentes variantes:

- **Capa única:**
 - **Cuencas automáticas** a partir del MDE sin depresiones, donde no se utilizan más capas de entradas y tan solo hay que marcar un umbral mínimo (número de celdas) por debajo del cual no se considera la existencia de una cuenca.
 - **Cuencas a un punto**, a partir del MDE sin depresiones y de la indicación de un punto a partir de los valores de su

coordenada X y de su coordenada Y. El resultado es un raster binario (0 | 1) donde las celdas que forman parte de la cuenca asumen el valor 1 y el resto el valor 0.

- **Capa múltiple:**

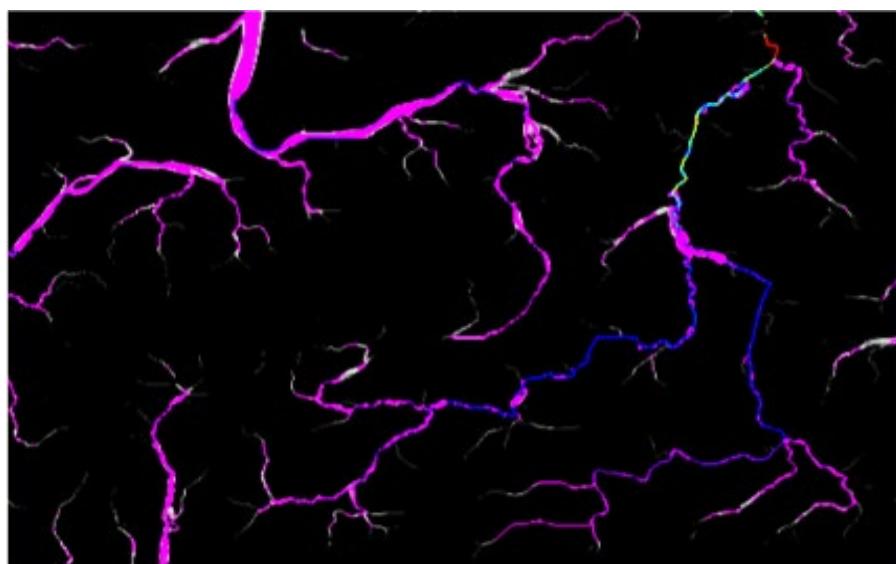
Cuenca vertiente a un elemento concreto representado en una capa, que es una operación espacial de capa múltiple dado que es necesario tener dos mapas de base: el MDT sin fosas y el mapa con el elemento de referencia para calcular la cuenca de drenaje.

5.2. Cálculo de la acumulación de flujo

 Operación espacial de capa única que **calcula “el valor de la superficie situada aguas arriba de cada celda (área de todas las celdas cuyo flujo, una vez conducido aguas abajo, acabará pasando por dicha celda)”** (Equipo Sextante, 2008).

El resultado es un mapa raster, tal como muestra la figura adjunta a modo de ejemplo, en el que cada pixel asume un valor de área y su configuración de conjunto evoca a las zonas donde aparecerían los cauces reales.

Figura 7. Ejemplo de capa de acumulación de flujo en la Hoja 35 – Cuadrante 3



Sin entrar en las particularidades y algoritmos propios de cada método posible para estimar la acumulación de flujo -D8, Rho8, DIinfinity, etc.- es posible destacar como uno de los más adecuados en cuanto a la calidad del modelo de acumulación resultante el método MFD (Dirección de flujo múltiple, que considera un flujo bidimensional).

Bloque 2.6. PRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN ASOCIADA AL MDE

El MDE contiene información muy útil para análisis diversos, de los cuales en este tema se presenta únicamente una selección. Es posible, incluso, utilizar las altitudes de la zona de estudio con un fin explicativo o de presentación del ámbito a analizar (bloques 3D, sombreado...) o, incluso, analizar las altitudes a partir de una determinada línea o eje mediante perfiles. Éstas son las utilidades que sin constituir propiamente operaciones espaciales se presentan en este último apartado.

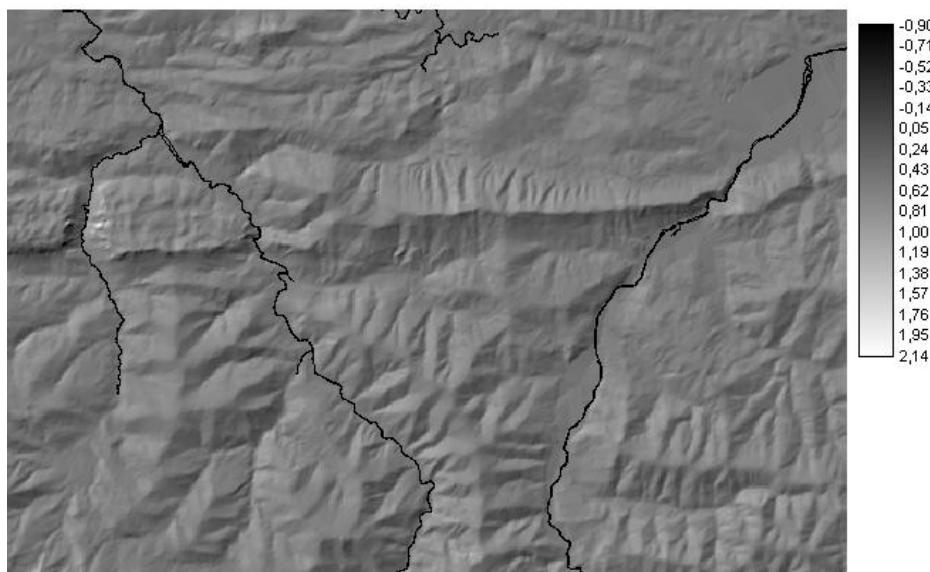
6.1. Mapas de sombras o relieve sombreado

Como señala M.A. Felicísimo por sombreado analítico se entiende “el proceso de asignación de un valor de reflectancia a cada punto de un mapa; para simular aspecto del relieve con el sombreado se hace más interpretable partiendo de la apariencia que tendría el terreno ante una fuente de luz; el procedimiento más sencillo es asignar un valor de reflectancia proporcional al ángulo de incidencia del vector luminoso sobre el terreno”⁶.

Su interpretación es más visual que cuantitativa, ya que representa las zonas de luz y sombra derivadas de la incidencia de una fuente luminosa (sol) sobre el área considerada (Equipo Sextante). Es una operación de capa única en la que se tiene en cuenta la altitud, ángulo de incidencia de la luz y el azimut.

⁶ FELICÍSIMO, A.M. *Glosario de términos usados en el trabajo con sistemas de información geográfica*. En: www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/glosario.pdf

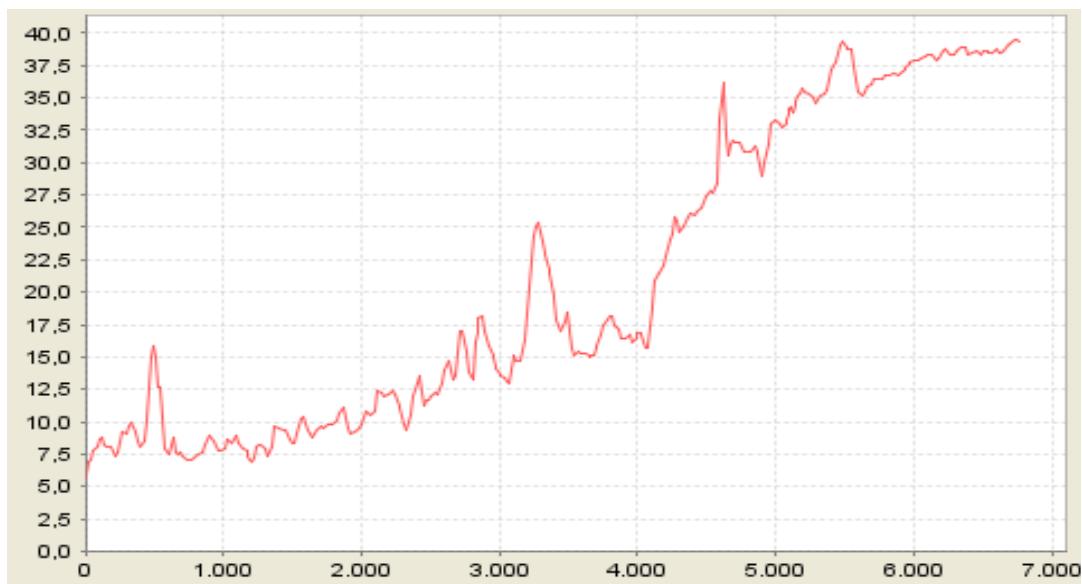
Figura 7. Ejemplo de sombreado analítico en la Hoja de Cabezón de la Sal



6.2. Perfiles

El perfil topográfico muestra las altitudes de los puntos (en este caso celdas) situados a lo largo de una línea de referencia dibujada sobre el ámbito de estudio. Esta línea de base para el perfil se almacena en un fichero vectorial. Para el cálculo de perfiles es necesario, por tanto, disponer del MDE en formato raster y de la línea de perfil en formato vectorial.

Figura 8. Ejemplo de perfil construido desde gvSIG



Además de la representación gráfica (exportable a png), del cálculo de perfiles se deriva un vectorial de puntos que corresponde a todas y cada una de las celdas representadas en el perfil para las cuales se obtienen sus coordenadas, la altitud medida, la distancia desde el origen y la distancia anisotrópica desde el origen.

BIBLIOGRAFÍA

- BOSQUE SENDRA, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, Rialp.
- CEBRIÁN, J.A. (1992): *Información geográfica y Sistemas de Información Geográfica* Santander, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- COMAS, D. y RUIZ, E. (1993): *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*. Barcelona: Ariel.
- EQUIPO SEXTANTE (2008): *Manual práctico de Sextante en GvSIG*. En: http://forge.osor.eu/plugins/scmsvn/viewcvs.php/*checkout*/docs/LaTeX/ManualPracticoSEXTANTE/ManualPracticoSEXTANTE.pdf?root=sextante&rev=54&athrev=54
- FELICÍSIMO, M.A.: *Introducción a los modelos digitales del terreno*.
- FELICÍSIMO, A.M. *Glosario de términos usados en el trabajo con sistemas de información geográfica*. En: www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/glosario.pdf
- GONZÁLEZ AGUAYO, R.: *Diccionario de términos SIG*. En formato pdf.
- GUTIÉRREZ PUEBLA, J. y GOULD, M. (1994): *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, Síntesis.
- LONGLEY, P., GOODCHILD M.F., MAGUIRRE, D.J., RHIND, D.W. (2011): *Geographic Information Systems and Science (3rd Edition)*. Chichester: John Wiley & Sons, cop. 2011.
- LAURINI, R. y THOMSON, D. (1992): *Fundamentals of Spatial Information Systems*. Academic, Press.
- MORENO JIMÉNEZ, A. (1999): *Población y espacio en la Comunidad de Madrid. Análisis y aplicaciones a nivel microgeográfico*. Consejería de Hacienda. Madrid
- OLAYA, V. (2020): Sistemas de Información Geográfica. En: <http://volaya.github.io/libro-sig/>
- SHERMAN, Gary E. (2008): *Desktop GIS: Mapping the planet with open source tools*. The Pragmatic Bookshelf.

TOBLER, W.R. (1959): "Automation and Cartography". *Geographical Review*, págs. 526–534.

VERDÚ BERNABEU, M.: *Tutorial para crear un MDE a partir de cotas con GvSIG*.