

## Capítulo 7

# El Modelo Digital de Terreno (MDT)

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (MDT). Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo.

Se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente raster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Aunque algunas definiciones incluyen dentro de los MDT prácticamente cualquier variable cuantitativa regionalizada, aquí se prefiere limitar el MDT al conjunto de capas derivadas del MDE.

El trabajo con un MDT incluye las siguientes fases que no son necesariamente consecutivas en el tiempo:

- Generación del MDE
- Manipulación del MDE para obtener otras capas del MDT (pendiente, orientación, curvatura, etc.)
- Visualización en dos dimensiones o mediante levantamientos 3D de todas las capas para localizar errores
- Análisis del MDT (estadístico, morfométrico, etc.)
- Aplicación, por ejemplo como variable independiente en un modelo de regresión que haga una estimación de la temperatura a partir de la altitud

Una de las razones por las que estas fases se solapan es que en muchos casos la manipulación, visualización y análisis van a permitir descubrir errores en el MDE. De este modo se vuelve a la primera fase y se genera un MDE mejorado.

### 7.1. El Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

#### 7.1.1. Estructuras de codificación de la elevación

Un Modelo Digital de Elevaciones puede representarse de forma genérica mediante la ecuación:

$$z = f(x, y) \quad (7.1)$$

que define un campo de variación continua. La imposibilidad de resolver la ecuación anterior para todos los puntos del territorio obliga a definir elementos discretos sobre el mismo que permitan simplificar la codificación de la elevación. Las más habituales son:

- **Curvas de nivel**, se trata de líneas, definidas por tanto como una sucesión de pares de coordenadas, que tienen como identificador el valor de la elevación en cada uno de los puntos de la línea. Generalmente el intervalo entre valores de las curvas de nivel es constante.
- **Red Irregular de Triángulos (TIN)**, a partir de un conjunto de puntos, en los que se conoce la elevación, se traza un conjunto de triángulos, formados por tripletas de puntos cercanos no colineales, formando un mosaico. En ocasiones se parte de las curvas de nivel que, tras descomponerse en un conjunto de puntos, genera una red irregular de triángulos. En este caso hay que tener en cuenta que pueden formarse triángulos a partir de puntos extraídos de la misma curva de nivel, por tanto con el mismo valor, que darán lugar a triángulos planos. Tienen entre sus ventajas el adaptarse mejor a las irregularidades del terreno, ocupar menos espacio y dar muy buenos resultados a la hora de visualizar modelos en 3D o determinar cuencas visuales. Entre los inconvenientes destaca un mayor tiempo de procesamiento y el resultar bastante ineficientes cuando se intenta integrarlos con información de otro tipo; en definitiva hay que utilizarlos para interpolar una capa raster como se vió en el tema anterior.
- **Formato raster**, es el más adecuado para la integración de las elevaciones en un SIG ya que va a permitir la utilización de diversas herramientas para la obtención de nuevos mapas a partir del MDE; por tanto va a ser el que se trate en este tema.

### 7.1.2. La construcción del MDE

Existen diversos métodos para construir un MDE:

- Métodos directos mediante sensores remotos:
  - **Altimetría**, altímetros transportados por aviones o satélites que permiten determinar las diferencias de altitud entre la superficie terrestre y el vehículo que transporta el altímetro (que se supone constante). El inconveniente es la baja resolución (celdillas muy grandes) de los datos y que se ve muy afectado por la rugosidad del terreno, por ello se limita al seguimiento de hielos polares.
  - **Radargrametría** o interferometría de imágenes radar. Un sensor radar emite un impulso electromagnético y lo recoge tras reflejarse en la superficie terrestre, conociendo el tiempo de retardo del pulso y su velocidad puede estimarse la distancia entre satélite y terreno. En 1999 la NASA inició el proyecto SRTM (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) para elaborar un mapa topográfico de toda la Tierra a partir de interferometría radar.
- Métodos directos sobre el terreno:

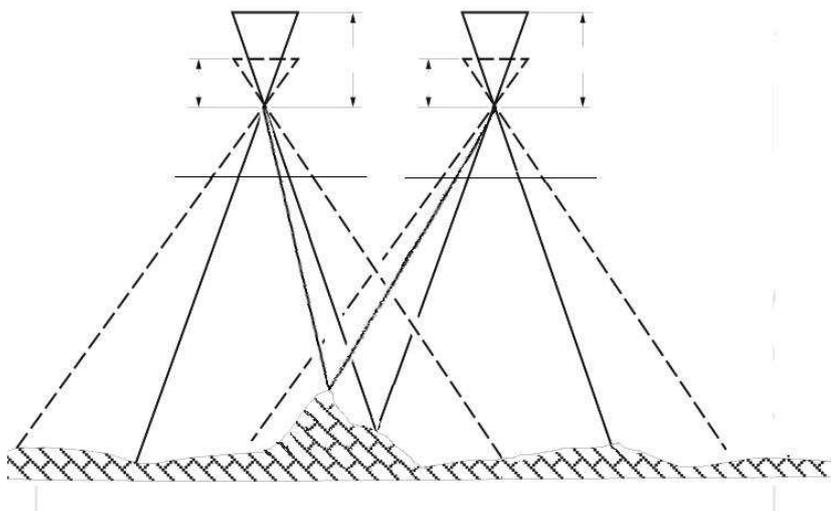


Figura 7.1: Utilización de la diferencia de paralaje en restitución fotogramétrica

- **Topografía convencional**, estaciones topográficas realizadas en el campo mediante dispositivos que permiten la grabación de datos puntuales que se interpolan posteriormente.
  - **Sistemas de Posicionamiento GPS**, sistema global de localización mediante satélites, que permite estimaciones suficientemente precisas de latitud, longitud y altitud de un punto, posteriormente deben interpolarse los datos.
- Métodos indirectos:
- **Restitución fotogramétrica** a partir de fuentes analógicas (fotografía aérea) o digitales (imágenes de satélite). El paralaje<sup>1</sup> de un punto en una fotografía aérea o imagen de satélite es proporcional a la distancia del objeto respecto al fondo de la misma (figura ??).
  - **Digitalización** de curvas de nivel de un mapa mediante escáner o tablero digitalizador e interpolación de las mismas.

Los trabajos de campo son bastante precisos y su resolución se decide *a priori*. Además es posible adaptar el muestreo a las condiciones y las irregularidades del terreno. El principal inconveniente es su elevado coste en tiempo y dinero. Sólo resulta rentable cuando se quiere conseguir un MDE muy detallado de una porción de terreno reducida.

La fotogrametría implica también un muestreo de puntos sobre los que calcular el paralaje, se trata sin embargo de un muestreo en gabinete por lo que no resulta tan costoso. Existen dispositivos que convierten la fotogrametría

<sup>1</sup>movimiento aparente de un objeto sobre el fondo de la imagen cuando se observa desde dos puntos de vista diferentes. Un ejemplo sencillo se obtiene al mirar un lápiz con uno y otro ojo sobre un fondo alejado. Cuando se mira con el ojo izquierdo el objeto parece desplazarse a la derecha y viceversa.

tría en un proceso semiautomáticos sin embargo resultan bastante caros. Al final tras obtener las elevaciones en una serie de puntos es necesario interpolar los resultados.

El método de generación de MDE más habitual y económico es la digitalización de curvas de nivel. En el tema anterior se vieron algunas técnicas para obtener buenos MDE a partir de curvas de nivel digitalizadas.

## 7.2. Validación de un Modelo Digital de Elevaciones. Detección y corrección de errores

Al igual que con cualquier otra variable espacial interpolada, es necesario validar un MDE tras su obtención, su calidad estriba en el tipo y magnitud de los errores cometidos cuya aparición es inevitable ya que se trata de un modelo, por tanto inherentemente impreciso. En el caso de las elevaciones una buena validación requiere algo más de atención ya que:

1. Constituye la información de partida para diversos análisis medioambientales y de ordenación posteriores. La pendiente, por ejemplo, es un parámetro clave en muchas aplicaciones.
2. Resulta relativamente sencillo obtener información de gran riqueza para la validación a partir de las diversas capas que forman el MDT. La elevación es además una variable permanente y más fácil de medir sobre el terreno que otras.
3. Los procedimientos de interpolación a partir de curvas de nivel pueden generar *artefactos*, se trata de geoformas artificiales que afectan dramáticamente la calidad del MDE.

La calidad de un MDE en formato raster va a depender tanto de los errores presentes en los datos con los que se ha construido como del procedimiento de interpolación que se ha llevado a cabo. Los errores debidos a los diversos métodos de interpolación ya se expusieron en el tema anterior. Los errores de los datos de partida pueden ser de dos tipos:

- **Errores posicionales** implican una mala localización geográfica de la cota o la curva de nivel y afectan, por tanto, a la situación en el plano XY. Si se trata de puntos tomados en el campo pueden deberse a los errores propios del procedimiento (GPS por ejemplo). Si se trata de curvas de nivel puede deberse a errores en el mapa de partida (o incluso a la generalización de las curvas en mapas de escala 1:200000 o inferior. Pero generalmente se deben al propio proceso de digitalización, a la incorrecta situación del cursor sobre el tablero en el momento de introducir el punto. Puede ser un error aleatorio, generalmente por cansancio, o el denominado *error de generalización* por el que se tienden a simplificar las formas que se digitalizan. Estos errores introducen una cierta incertidumbre en cuanto a la localización de las líneas. Son difíciles de evitar y detectar a posteriori, como normas generales es preferible digitalizar sobre mapas escaneados y evitar sesiones de trabajo largas.

## 7.2. VALIDACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES. DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES

- **Errores atributivos** suponen una asignación imprecisa de la altitud asociada a la cota o a la curva e implican a las coordenadas en el eje Z. Si se trata de puntos en el campo el origen es el mismo que en el caso anterior. En el caso de curvas de nivel digitalizadas, los errores van a ser de carácter aleatorio y fácilmente detectables en los mapas derivados del MDE.

### 7.2.1. Test para la validación de un mapa de elevaciones

Un **análisis visual** del modelo permitirá una evaluación global de la calidad del mismo, especialmente si se trata de un DEM con alta resolución. Puede compararse una visualización 3D del modelo con una fotografía (o directamente en el campo) y tratar de descubrir puntos erróneos. La visualización de mapas derivados (pendiente y orientación) resultan muy útiles para detectar errores atributivos en las curvas de nivel digitalizadas. Un mal etiquetado de una curva de nivel va a generar valores de pendiente anormalmente elevados que destacarán mucho en un simple análisis visual.

Posteriormente debe hacerse un **análisis estadístico del MDE**, un simple histograma de las elevaciones permitirá descubrir anomalías no detectables con la simple visualización, como el que los valores de las curvas de nivel aparezcan con excesiva frecuencia.

A continuación puede estimarse el error medio mediante un muestreo de errores. Se trata de calcular el error cometido en diversos puntos cuya altitud se ha medido en el campo y hacer un análisis estadístico de los mismos. En este sentido, el error de altitud en un punto  $x, y$  se define como la diferencia entre la altitud real y la estimada:

$$\epsilon_{x,y} = \hat{Z}_{x,y} - Z_{x,y} \quad (7.2)$$

Si se obtiene el valor de  $\epsilon_{x,y}$  para un número de puntos de validación suficientemente alto, se obtiene una muestra de errores cuyas propiedades deseables son:

- media y varianza próximas a cero
- independencia espacial, es decir que los errores no sean sistemáticamente mayores en unos sectores que en otros
- no autocorrelación, es decir que la magnitud del error en un punto es independiente de los errores en puntos cercanos.

Un estadístico válido como aproximación global es el error cuadrático medio que se define como:

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{x,y}^2}{N}} \quad (7.3)$$

donde  $N$  es el tamaño de la muestra de errores.

Un análisis estadístico de este tipo sólo permite determinar la precisión en la estimación de  $Z$  en los puntos de muestreo, sin embargo un buen MDE debe conservar las relaciones entre las celdillas vecinas de manera que no haya alteraciones significativas en las variables obtenidas a través de operadores de vecindad, por tanto debe hacerse un **análisis de errores en los mapas derivados**.

En relación con el anterior punto, un **análisis de transectos** permitirá verificar la aparición de artefactos, como cambios bruscos en la pendiente, a lo largo de las laderas.

El análisis de la **consistencia hidrológica** permite extender el análisis de transectos a dos dimensiones. La idea básica es que un MDE debe tener la misma respuesta hidrológica que el terreno que modeliza. Un buen ejemplo de este tipo de análisis sería verificar si se puede reconstruir correctamente la red de drenaje.

### 7.3. Obtención de variables derivadas

Un MDE no solamente contiene información explícita acerca de la altitud en un área muestreada en diversos puntos (modelo TIN) o celdillas (modelo raster) sino que también aporta información relativa a las relaciones (distancia y vecindad) entre los diferentes valores de altitud. Ello permite el cálculo, a partir de diversos procedimientos de álgebra de mapas, de nuevas variables topográficas. En la figura ?? aparece el Modelo Digital de Elevaciones de una pequeña zona de poco más de  $2 \text{ Km}^2$  situada un kilómetro al Sur de Pliego. El MDE se ha hecho a partir de curvas de nivel a escala 1:5000 y se utilizará para presentar los diferentes mapas derivados.

La **pendiente** en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. Su estimación es sencilla a partir del MDE, aunque existen diferentes procedimientos que dan lugar a diferentes resultados (cuando se trabaja con un programa es importante conocer cual es el algoritmo que utiliza para calcular pendientes) entre los métodos habituales están:

- Pendiente máxima de la celdilla central con respecto a los valores vecinos, adecuado para evaluación de la erosión
- Pendiente media de la celdilla central con respecto a cada uno de los valores vecinos
- Pendiente en el sentido del flujo descendente, adecuado en celdillas correspondientes a cauces en aplicaciones de tipo hidrológico
- Ajuste de una superficie a los 9 valores de elevación correspondientes a la celdilla central y sus 8 celdillas vecinas

$$Z = aX^2 + bY^2 + cXY + dX + eY + f \quad (7.4)$$

Los parámetros de esta ecuación se calculan para cada celdilla a partir de una vecindad de  $3 \times 3$  celdillas

z1	z2	z3
z4	z5	z6
z7	z8	z9

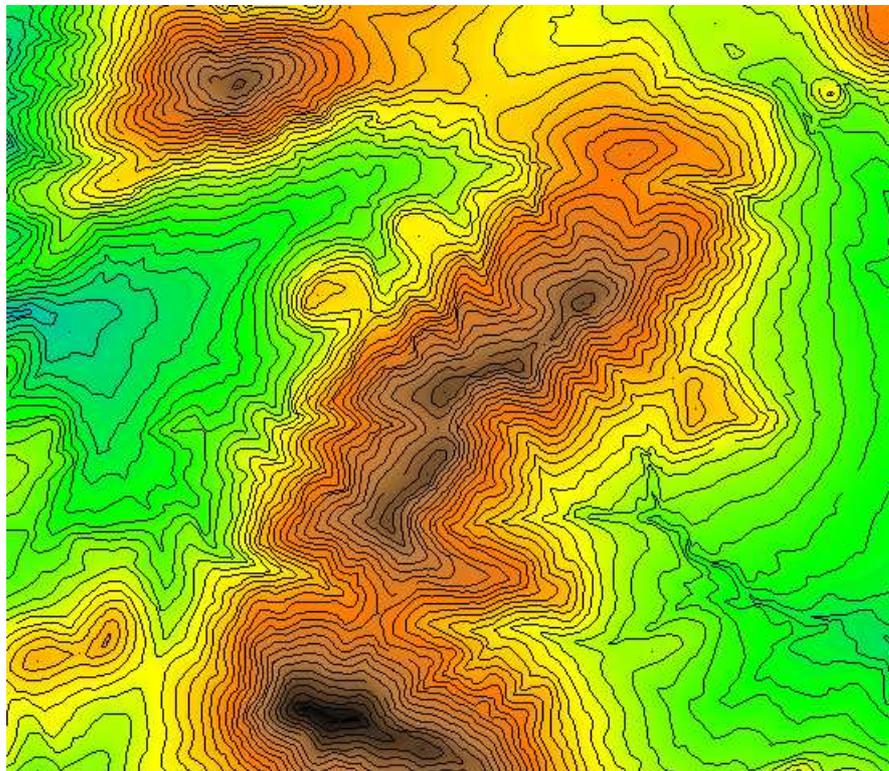


Figura 7.2: Modelo Digital de Elevaciones

mediante las ecuaciones:

$$a = \frac{z1 + z3 + z4 + z6 + z7 + z9}{6g^2} - \frac{z2 + z5 + z8}{3g^2} \quad (7.5)$$

$$b = \frac{z1 + z2 + z3 + z7 + z8 + z9}{6g^2} - \frac{z4 + z5 + z6}{3g^2} \quad (7.6)$$

$$c = \frac{z3 + z7 - z1 - z9}{4g^2} \quad (7.7)$$

$$d = \frac{z3 + z6 + z9 - z1 - z4 - z7}{6g^2} \quad (7.8)$$

$$e = \frac{z1 + z2 + z3 - z7 - z8 - z9}{6g^2} \quad (7.9)$$

$$f = \frac{2(z2 + z4 + z6 + z8)3 - z7 - (z1 + z3 + z7 + z9) + 5z5}{9} \quad (7.10)$$

$$(7.11)$$

La pendiente (figuras ?? y ??) se calcula cómo:

$$s = \text{atn}(\sqrt{d^2 + e^2}) \quad (7.12)$$

La **orientación** (figuras ?? y ??) 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. Como en el caso de la pendiente, el valor de orientación se estima directamente a partir de los parámetros obtenidos de ajustar una superficie cuadrática a los nueve valores de la celdilla central y su entorno:

$$o = \text{atn}(e/d) \quad (7.13)$$

La **curvatura** es la tasa de cambio en la pendiente, depende de las derivadas de segundo grado de la altitud, es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto. A efectos prácticos puede calcularse como la pendiente de la pendiente. La curvatura tiene especial interés como variable influyente en fenómenos como la escorrentía superficial, canalización de aludes, erosión y flujos en general.

La curvatura en las direcciones longitudinal y transversal al perfil de la ladera se calcula como:

$$C_l = -2\left(\frac{ad^2 + be^2 + cde}{d^2 + e^2}\right) \quad (7.14)$$

$$C_t = -2\left(\frac{bd^2 + ae^2 - cde}{d^2 + e^2}\right) \quad (7.15)$$

$$(7.16)$$

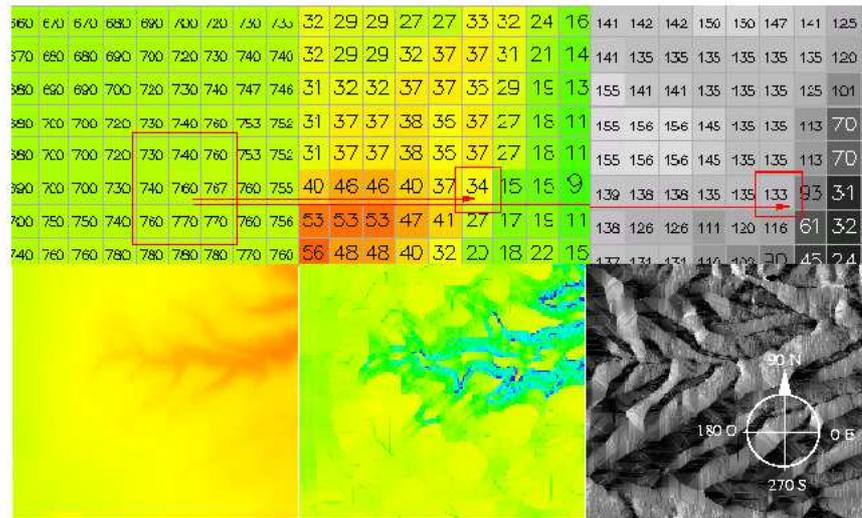


Figura 7.3: Operador de vecindad, cálculo de pendientes y orientaciones

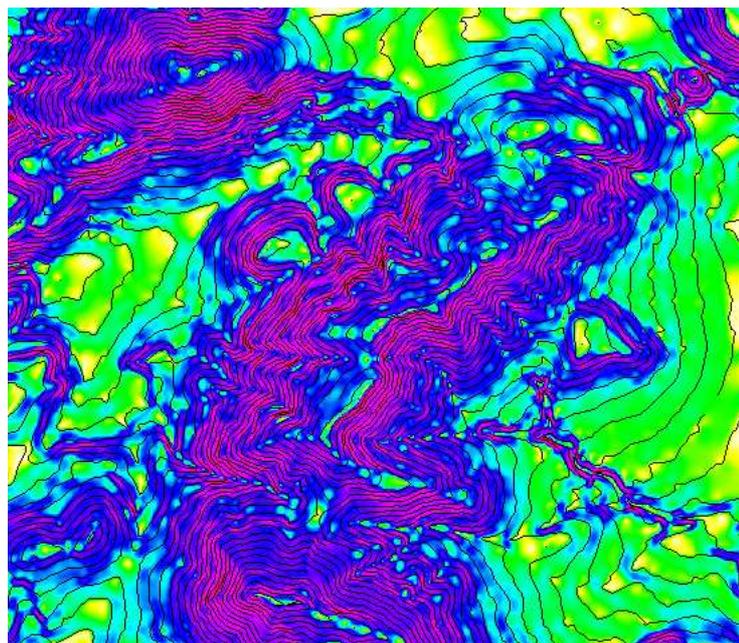


Figura 7.4: Mapa de pendientes

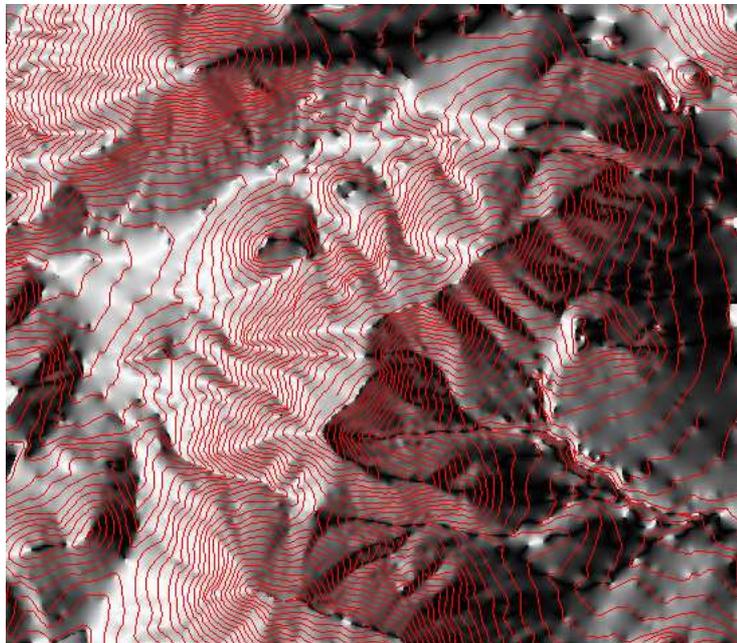


Figura 7.5: Mapa de orientaciones

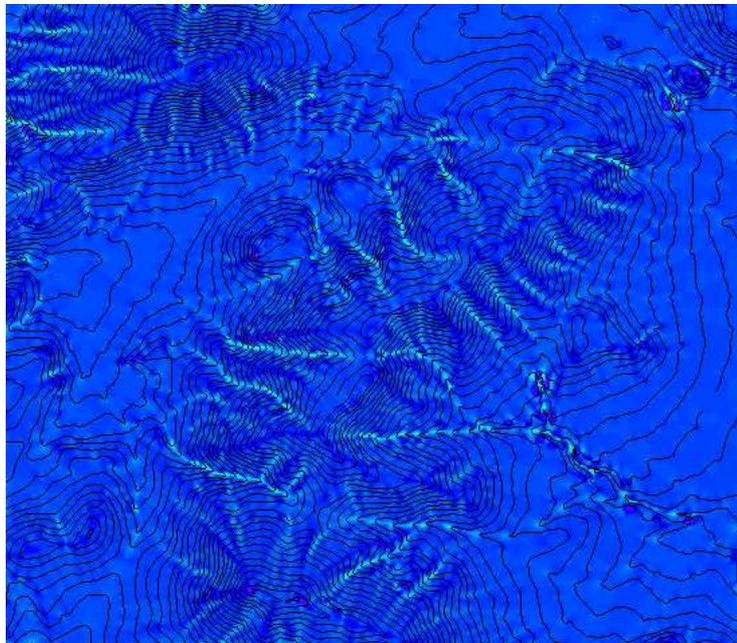


Figura 7.6: Mapa de curvatura en sentido transversal a la pendiente

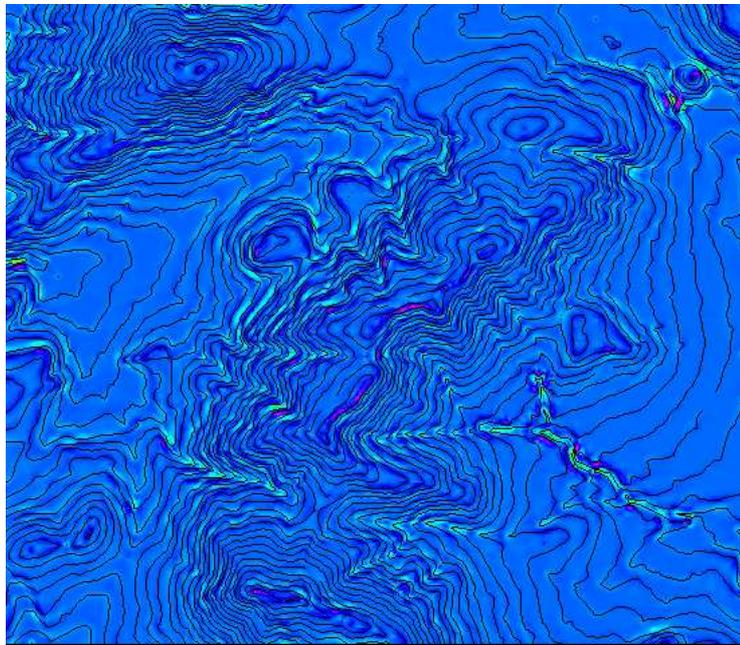


Figura 7.7: Mapa de curvatura en sentido perpendicular a la pendiente

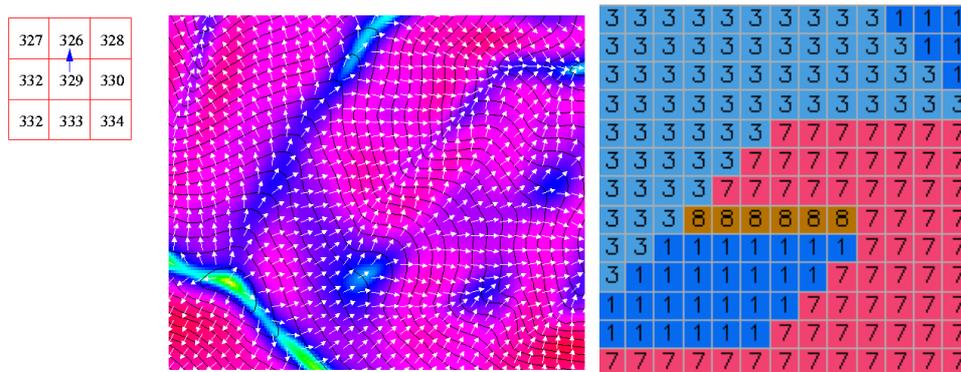


Figura 7.8: Operador de vecindad. Cálculo de la dirección de flujo

El problema de estos parámetros es que quedan indeterminados cuando la pendiente es cero. Otros parámetros relacionados con la curvatura y que no tienen este problema son la convexidad máxima y mínima:

$$Conv_{max} = a - b + \sqrt{(a - b)^2 + c^2} \tag{7.17}$$

$$Conv_{min} = a - b - \sqrt{(a - b)^2 + c^2} \tag{7.18}$$

$$\tag{7.19}$$

La **dirección de flujo** representa la dirección hacia la que drenaría un volumen de agua situado sobre una celdilla. Puesto que toda celdilla está rodeada por otras 8, puede tomar 8 valores diferentes. Es necesario establecer criterios para asignar valores numéricos a las 8 direcciones posibles. Generalmente se toma un valor de 1 para la dirección Norte y los siguientes en el sentido de las agujas del reloj. Un valor 0 indicaría una celdilla endorreica.

La **rugosidad** es un concepto intuitivamente sencillo pero del que se han propuesto múltiples definiciones matemáticas. El rango, la desviación típica, el coeficiente de variación de la altitud o la varianza de la pendiente en la vecindad de una celdilla constituyen buenos estimadores de la rugosidad (figura ??).

### 7.4. Clasificación de las formas del relieve

Los parámetros cuyo cálculo se ha estudiado en la sección anterior (pendiente, orientación, curvaturas y rugosidad) van a constituir un conjunto de nuevas capas raster que forman parte, junto al MDE, del MDT. De este modo cada celdilla pasa de estar caracterizada por un valor único de altitud a presentar un conjunto de variables que pueden ser utilizadas para caracterizar, desde un punto de vista geomorfológico, las diferentes celdillas en unidades de paisaje tipo. No hay que olvidar sin embargo la fuerte dependencia que todos estos parámetros tienen respecto a la escala.

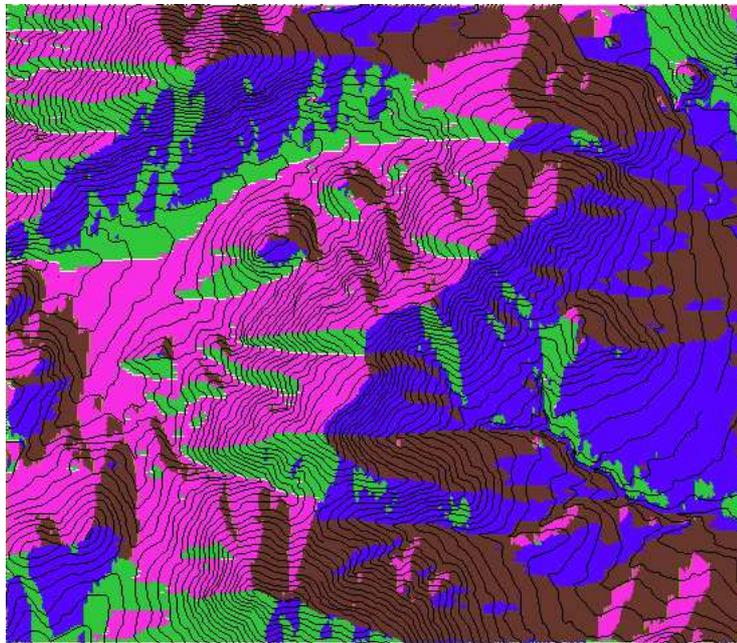


Figura 7.9: Mapa de dirección del flujo

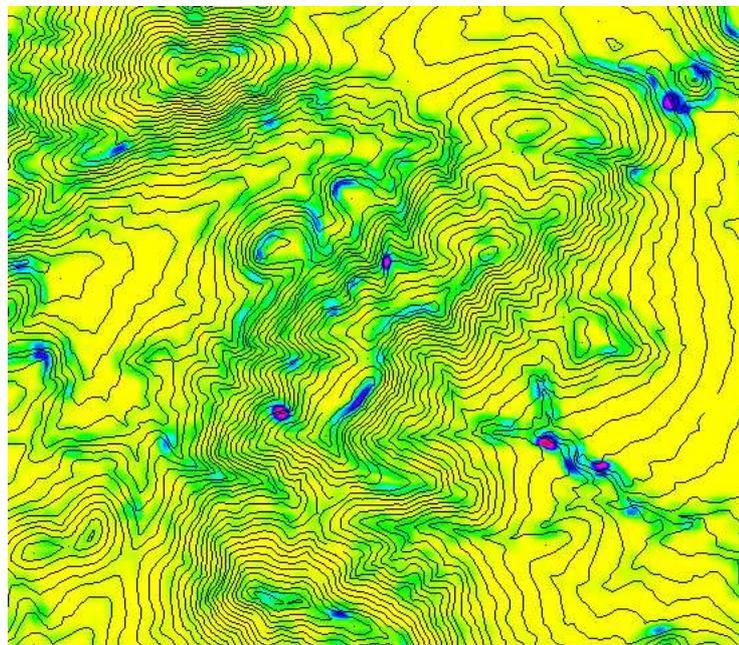


Figura 7.10: Mapa de rugosidad

Forma	pendiente	$C_t$	$Conv_{max}$	$Conv_{min}$
Pico	0	#	+	+
Cresta	0	#	+	0
	+	+	#	#
Collado	0	#	+	-
Plano	0	#	0	0
	+	0	#	#
Canal	0	#	0	-
	+	-	#	#
Pozo	0	#	-	-

Cuadro 7.1: Criterios de clasificación de formas de relieve

Wood propone un esquema de clasificación simple basado en 6 formastipo que se caracterizan, de un modo semicuantitativo, en la siguiente tabla:

En esta tabla + significa mayor que 0 - significa menor que 0 y # indiferente. Lógicamente es necesario definir para cada variable unos umbrales, negativo y positivo, entre los cuales el valor se considera igual a cero.

Para resolver el problema de la dependencia de la escala se han propuesto esquemas de clasificación basados en el cálculo de estas variables a partir de ventanas de diferente tamaño.

## 7.5. Aplicaciones de los MDT

### 7.5.1. Apoyo en análisis estadísticos

Las variables incluidas en un MDT son factores de gran importancia en un gran número de procesos ambientales (precipitación, insolación-temperatura, flujos hídricos, erosión, distribución de hábitats, etc.) por tanto van a ser un elemento clave a la hora de estimar otras variables mediante procedimientos de interpolación global por regresión.

El procedimiento básico sería medir en diferentes puntos del área de estudio la variable independiente junto con las variables dependientes incluidas en el MDT. Un análisis posterior generaría un modelo de regresión de tipo  $Y = F(Z, S, O, C_t, ..)$ . Puesto que se dispone de capas raster para cada una de estas variables, resultará fácil llevar a cabo la interpolación por regresión.

### 7.5.2. Modelos climáticos

La topografía es el principal factor local que limita la energía solar incidente sobre la superficie terrestre. La variedad de altitudes, pendientes y orientaciones crean fuertes contrastes locales que afectan directa e indirectamente a procesos biológicos y físicos. Algunos de estos factores son modelizables con los MDT.

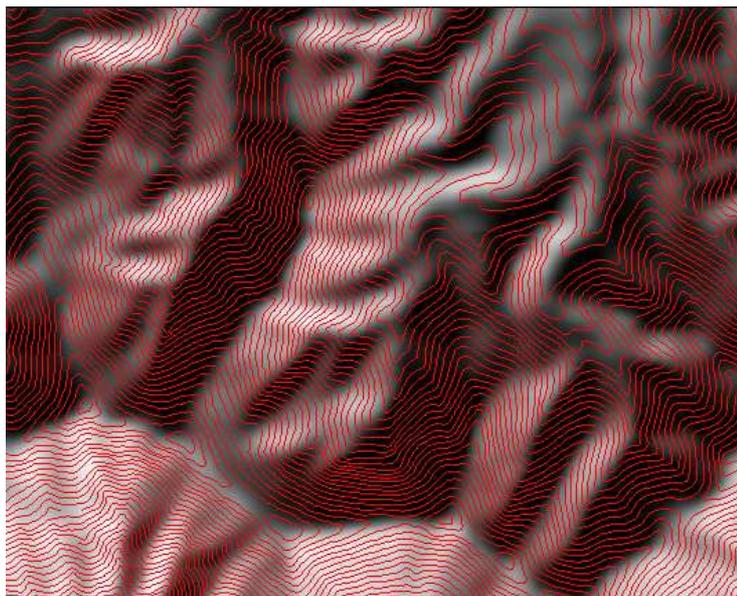


Figura 7.11: Insolación recibida el 17 de Enero a las 10:00 AM hora solar

- Sombras para una determinada posición del sol
- Angulo de incidencia del sol

La existencia de zonas de sombra es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante más importante del clima local. Se define la insolación potencial en un punto como el tiempo máximo que ese lugar puede estar sometido a la radiación solar directa en ausencia de nubosidad. La insolación potencial depende directamente del ángulo de incidencia del sol respecto a la superficie terrestre y del ocultamiento topográfico ante una trayectoria concreta del Sol.

La insolación potencial se expresa en unidades energía partido por espacio y se refiere a un instante concreto. Puede, sin embargo, integrarse para períodos de tiempo mayores de tiempo mayores.

La relación entre cada celda y la superficie de referencia se realiza mediante un índice de exposición definido como el cociente entre la radiación solar incidente sobre un lugar del terreno y la superficie de referencia. El cálculo de los índices de exposición nos da un parámetro cuantitativo útil a la hora de comparar las condiciones ambientales en una zona determinada ya que representan una medida objetiva de las diferencias dentro del área del modelo basada exclusivamente en criterios geométricos.

El ángulo solar resulta además de utilidad en aplicaciones relacionadas con la teledetección (corrección por iluminación y cálculo de reflectividades). En cuanto a la radiación recibida se utiliza en:

1. Modelos de estimación de variables climáticas (temperatura, evapotranspiración)

2. Modelos de distribución potencial de especies animales o vegetales

### 7.5.3. Modelos hidrológicos

La superficie terrestre constituye la base sobre la que tienen lugar, y que por tanto condiciona, gran parte de los procesos de transferencia de materia y energía que tienen lugar sobre la superficie terrestre.

La disponibilidad de un modelo de dicha superficie permite simular estos procesos, con lo que se consigue experimentar independientemente del sistema real. La simulación permite obviar los riesgos inherentes a la experimentación, alcanzar una completa independencia temporal, repetir el experimento un número de veces arbitrario.

Las características topográficas de una ladera determinan las pautas por las cuales el agua circula sobre ella. El modelo digital de elevaciones contiene información suficiente para definir, al menos en una primera aproximación, las propiedades de la red de drenaje superficial y, por extensión, de la cuenca hidrológica.

Se denomina **línea de flujo** al trayecto que, a partir de un punto inicial, seguiría la escorrentía superficial sobre el terreno

Las líneas de flujo siguen la línea de máxima pendiente por lo que pueden deducirse del modelo digital de pendientes con las únicas limitaciones que las derivadas de la calidad del MDE original.

A partir del trazado de las líneas de flujo es posible definir la red hidrológica, el **área subsidiaria de una celda** y, por extensión, las cuencas hidrológicas: Se define el área subsidiaria de una celda como el conjunto de celdas cuyas líneas de flujo convergen en ella; una cuenca hidrológica está formada por el área subsidiaria de una celda singular, que actúa como sumidero

La magnitud del área subsidiaria de una celda del MDE está directamente relacionada con el **caudal máximo potencial**, CMP, en el mismo. En efecto, el caudal que puede circular en un momento dado en un punto del terreno depende, entre otros factores, de la magnitud del área subsidiaria, de las precipitaciones sobre ella y de la pendiente de la zona, que permite la circulación con menor o mayor rapidez. En función de estos parámetros es posible simular el CMP en un modelo digital del terreno.

Otra información de gran interés hidrológico directamente extraíble de un MDT son las redes de drenaje. Para ello se parte de la hipótesis de que hay un valor umbral de área subsidiaria por encima del cual el cauce en cuestión puede considerarse como perteneciente a un cauce. Por tanto basta con reclasificar el mapa de áreas subsidiarias para asignar un valor 1 a aquellas celdillas con área subsidiaria mayor que dicho umbral y valor 0 o nulo a las restantes. Finalmente, si se quiere el mapa de redes de drenaje en formato vectorial se deberá realizar el correspondiente cambio de formato.

Las redes de drenaje extraídas con este procedimiento presentan algunas deficiencias (figura ??):

- El que en una determinada celdilla se inicie un cauce depende no sólo de su área subsidiaria sino también de las características litológicas e incluso de uso del suelo de la misma. Por tanto utilizar un sólo valor umbral para todo el área de trabajo resulta bastante simplista.

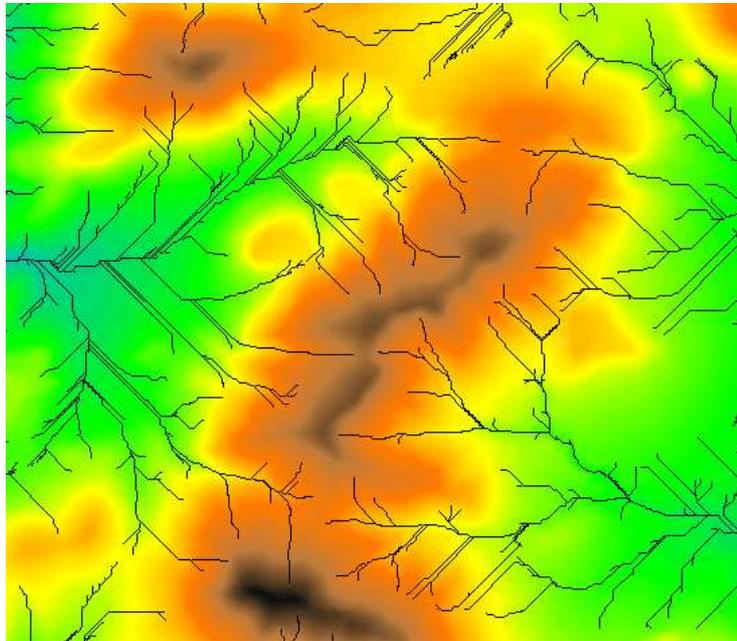


Figura 7.12: Red de drenaje extraída por procedimientos automáticos a partir del modelo de elevaciones.

- Debido al algoritmo que genera las direcciones de flujo y los mapas de área subsidiaria, los cauces resultantes tienden a adoptar un carácter rectilíneo

La modelización hidrológica basada en modelos digitales de terreno pretende estimar los caudales generados en una cuenca a partir de sus características topográficas así como las áreas inundables en función de la altura esperable de las láminas de agua. Evidentemente, es necesario compaginar los resultados obtenidos a partir de los modelos de elevaciones con estimaciones de la capacidad de infiltración de los suelos o la estimación de precipitaciones máximas esperables.

#### 7.5.4. Modelos de visibilidad

Los modelos de visibilidad establecen el área que se puede ver desde un punto y, por tanto, el área desde la que puede verse ese punto. El primer caso puede ser útil para el diseño de redes de control (de incendios forestales por ejemplo), el segundo como criterio a la hora de ubicar infraestructuras desagradables (vertederos).

Dos puntos serán mutuamente visibles si la línea recta que los une tiene siempre una altitud superior a la del terreno. La cuenca visual de un punto base sería entonces el conjunto de puntos de un MDE que son mutuamente visibles con dicho punto base.

El análisis de cuencas visuales puede utilizarse para la evaluación del impacto visual de actuaciones con efectos negativos sobre el paisaje. Es posible construir un modelo de visibilidad, donde cada punto tiene asignado un valor proporcional a la extensión de su cuenca visual. Un modelo de este tipo puede servir de base objetiva para la toma de decisiones ya que permite conocer y comparar con fiabilidad la incidencia visual de las alternativas existentes.

## 7.6. Bibliografía

- Felicísimo, A.M. (1994) *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales* 118 pp. (<http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>)
- Felicísimo, A.M. (1999) La utilización de los MDT en los estudios del medio físico, 16 pp. ([http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE\\_150a.pdf](http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE_150a.pdf))
- Olaya Ferrero, V. (2004) *Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno* 365 pp.
- Weibel, R. & Heller, M. (1991) *Digital Terrain Modelling Geographical Information Systems: Principles and Applications* John Wiley & sons pp. 269-297 (<http://www.wiley.co.uk/wileychi/gis/resources.html>)
- Wood, J. (1996) *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models* (<http://www.soi.city.ac.uk/jwo/phd/>)

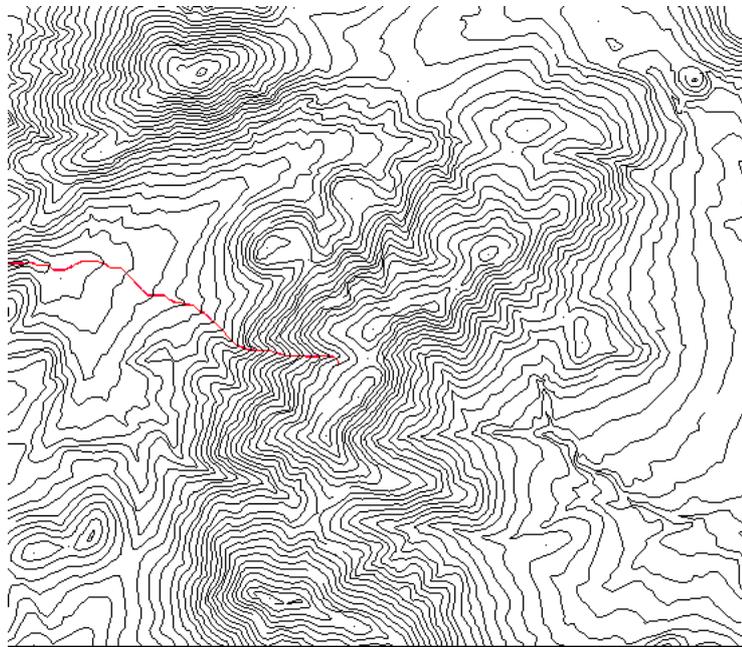


Figura 7.13: Trayectoria del agua a partir de un punto

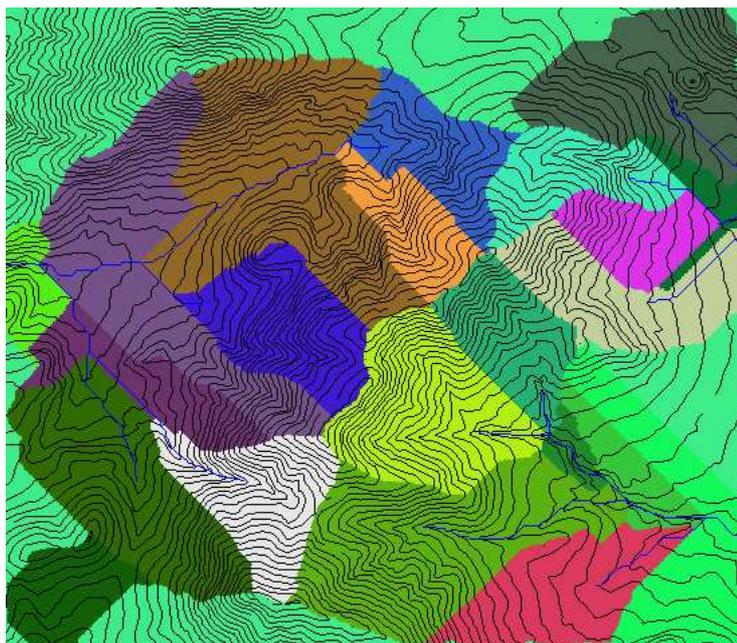


Figura 7.14: Obtención de cuencas y redes de drenaje

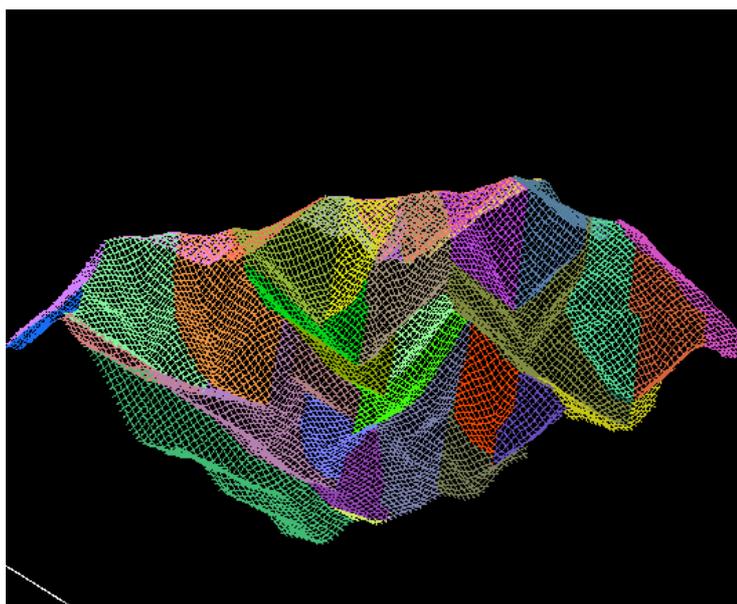


Figura 7.15: Visión 3D de cuencas de drenaje