

**CARTOGRAFÍA II**

**REPRESENTACIÓN DEL RELIEVE**

**2008**



**Índice:**

<b>1. El relieve de elementos lineales</b>	<b>5</b>
1.1. Introducción	5
1.2. Visión histórica	6
1.3. Líneas estructurales	7
1.3.1. Introducción	7
1.3.2. Ayuda en la representación del relieve	7
1.3.3. Las líneas estructurales como representación del relieve	8
1.4. Las normales	8
1.4.1. Las normales de pendiente	9
1.4.2. Las normales de sombra	11
1.4.3. Normales simplificadas	12
1.4.4. La utilización actual de las normales	12
1.5. Puntos acotados	13
1.5.1. El datum	13
1.5.2. Precisión de los puntos acotados	14
1.5.3. Naturaleza y densidad de los puntos acotados	14
1.5.4. Simbolización	14
1.6. Curvas de nivel	15
1.6.1. Obtención de las curvas	15
1.6.2. Intervalo entre curvas de nivel	15
1.6.3. Curvas intercaladas	16
1.6.4. Curvas maestras	18
1.6.5. Curvas de depresión	18
1.6.6. Selección de los valores de las curvas de nivel	18
1.6.7. El color	19
1.6.8. El grosor	19
1.6.9. La rotulación	19
1.6.10. Variaciones sobre las curvas de nivel	21
1.7. Dibujo de roquedo	22
<b>2. El relieve de elementos superficiales</b>	<b>25</b>
2.1. Sombreado	25
2.1.1. Sombreado de pendiente	25
2.1.2. Sombreado oblicuo	26
2.1.3. Sombreado combinado	28
2.1.4. La perspectiva aérea o atmosférica en el sombreado	28
2.1.5. El color en el sombreado	28
2.1.6. Métodos manuales de obtención del sombreado	29
2.1.7. Métodos fotográficos de obtención del sombreado	29
2.1.8. Métodos analíticos de obtención del sombreado	29
2.1.9. Combinaciones del sombreado	29
2.2. Tintas hipsométricas	31
2.2.1. Selección de las zonas	31
2.2.2. Zonas con incrementos iguales	32
2.2.3. Progresión aritmética	33
2.2.4. Progresión geométrica	33
2.2.5. Selección de zonas en la práctica	34
2.2.6. La curva hipsométrica del fondo del océano	35
2.2.7. Selección de la gama de color	35
2.2.8. Gammas tradicionales de color	36

2.2.9. Modificaciones a la gama de color tradicional	36
2.2.10. Gama basada en el contraste de colores	36
2.2.11. Gama basada en la variación de altitud	37
2.2.12. Gammas para conseguir efecto tridimensional	37
2.2.13. Gammas para el océano	37
2.2.14. Gammas para escalas medias y pequeñas	37
2.2.15. Ajuste de la gama al número de intervalos	38
2.2.16. Utilización de las curvas con las tintas hipsométricas	38
<b>3. Modelos digitales del terreno</b>	<b>39</b>
3.1. Introducción	39
3.1.1. Visión histórica	39
3.1.2. Conceptos generales	39
3.1.3. Definiciones	39
3.2. Características de los modelos digitales	40
3.2.1. Ventajas	40
3.2.2. Desventajas	41
3.3. Estructuras de datos	41
3.3.1. Modelos de triángulos irregulares (TIN)	41
3.3.2. Modelos de rejillas regulares (DEM)	43
3.4. Elección de la estructura de datos	44
3.5. Captura de datos	44
3.5.1. Métodos directos	44
3.5.2. Métodos indirectos	45
3.6. Elementos importantes para un modelo digital	45
3.7. Precisión del MDT	46
3.8. Fuentes del error MDT	46
3.9. Aplicaciones de los MDT	46

## 1.El relieve de elementos lineales

### 1.1. Introducción

En toda clase de actividades humanas, el relieve del terreno juega un papel de gran importancia. La información sobre el relieve se requiere para muchos propósitos: toda clase de trabajos de construcción, como carreteras, muelles, trabajos de regadíos, operaciones militares, navegación aérea, fines científicos, turísticos, y muchas otras aplicaciones.

Concierne al topógrafo ofrecer esta información del relieve, tridimensional en la naturaleza, como una representación bidimensional en el mapa. Esta reducción del número de dimensiones representa el problema de más difícil solución en Cartografía.

Una visión retrospectiva de cómo se ha representado esta tercera dimensión de la superficie terrestre en el pasado, demuestra que esta tarea no estaba exenta de dificultades. De hecho, todavía se representaba de forma simbólica en los siglos XVI y XVII donde simplemente se informaba sobre la situación de una montaña sin hacer referencia alguna a diferencias relativas en altitud.

Durante los siglos XVIII y XIX comienzan fuertes campañas, realizadas por distintos países europeos, con el objeto de obtener series cartográficas a escalas relativamente grandes. Este esfuerzo lleva a plantearse la necesidad de aportar una información más fiable del relieve. Se comienza un intento de cuantificar su información con las normales de pendiente empleadas en estos siglos.

Este desarrollo histórico es el reflejo, por un lado del avance de las necesidades de la sociedad y, por otro lado, del avance de las técnicas de levantamientos, con la introducción de las fotografías aéreas y de la Fotogrametría y, también, del avance de las técnicas que utiliza la Cartografía, como la reproducción cartográfica.

Hoy en día, el cartógrafo ha alcanzado un nivel de representación cualitativa y cuantitativa del relieve muy completo, en el que las curvas de nivel, los puntos acotados, el dibujo de roquedo, la representación del micro-relieve, y la aplicación de sombreados se pueden combinar a la perfección, no dejando demasiados huecos para nuevas innovaciones en el futuro.

Este futuro es dominado por las nuevas tecnologías y herramientas de representación del relieve, como son los modelos digitales del terreno y los mapas derivados de ellos.

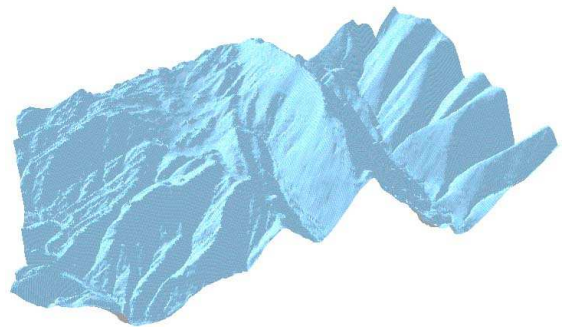


Ilustración 1.1.1: Modelo digital del terreno

Una visión conjunta de los métodos, antiguos y modernos, de representación del relieve ofrece claramente el dilema con el que se han encontrado siempre los cartógrafos: por un lado, la necesidad de presentar la información de forma cuantitativamente precisa y, por otro lado, representar el terreno ofreciendo una buena imagen visual del mismo aún a costa de sacrificar la información numérica.

En cualquier caso, antes de abordar el tema, se hará hincapié en no entender el relieve como la altura de los puntos o la diferencia de altura entre ellos. El relieve se refiere a la forma total de la tercera dimensión de la superficie de la Tierra tanto cualitativa como cuantitativamente.

## 1.2. Visión histórica

Las primeras representaciones del relieve se caracterizan por ser meramente simbólicas, como montículos de topos. No se pretende representar las montañas con su forma real ni cualquier indicación de las diferencias de alturas. El cartógrafo observa el paisaje desde un lugar en la superficie del terreno y representa sólo el aspecto de las cordilleras y su extensión.

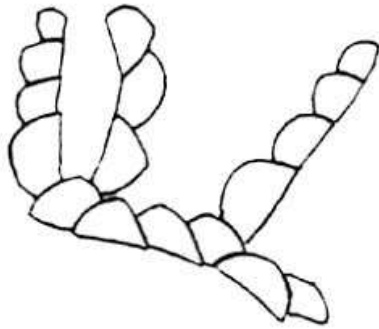


Ilustración 1.2.1: Representación del relieve con símbolos orientados (Cartografía de Mesopotamia sobre 2200 AC)

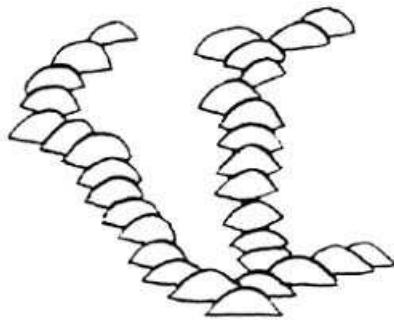


Ilustración 1.2.2: Estilo de representación estandarizada del relieve como si fueran "toperas" o "escamas de pez" (S. XV)



Ilustración 1.2.3: Representación del relieve utilizando símbolos de diferentes tamaños y sombreado (S. XVI)

En los siglos XVI y XVII, un importante periodo de la Cartografía con nombres de cartógrafos tan importantes como Anich, Blaeu, Mercator, Ortelius, Plancius, Saxton y otro muchos, el punto de observación cambió desde la superficie del terreno a una posición elevada ligeramente, resultando la representación en la forma llamada "vista de pájaro". El relieve se muestra ahora más realista, realizado de forma perspectiva según su apariencia natural. Sin embargo, las informaciones sobre alturas y desniveles siguen sin producirse por falta de medios técnicos.



Ilustración 1.2.4: Mapa de representación del relieve en el S. XVII

Con la introducción de programas de desarrollo de la Cartografía de forma sistemática, durante el siglo XIX, en varios países de Europa, se produjo una variación en la precisión de las informaciones sobre el relieve. En los mapas confeccionados en esa época, el relieve ya no se representa de forma oblicua sino como si el observador se encontrase situado sobre la zona a representar. Se representaba de forma ortogonal y de hecho se introdujeron las técnicas geométricas de representación ortogonal como las normales de pendiente. El paso a esta visión ortogonal del terreno permite representar el terreno con indicaciones de cantidad (de altitud) obteniendo así una representación más exacta del mismo.

A continuación se muestran distintos sistemas de representación del relieve, en concreto las líneas estructurales, las normales, los puntos acotados, las curvas de nivel, el sombreado y las tintas hipsométricas. Son distintas soluciones a un mismo problema que, a menudo, se utilizarán combinándolas para una mejor expresión gráfica de la topografía del terreno.

### 1.3. Líneas estructurales

#### 1.3.1. Introducción

Las líneas estructurales son las líneas descriptoras del relieve, como pueden ser los bordes de las plataformas, los bordes de las cuencas, los cambios de pendiente..., es decir, son el “esqueleto” del terreno, los elementos que definen cómo se distribuye el relieve de una zona determinada.

Se pueden diferenciar dos tipos de líneas estructurales en función del elemento geográfico que representan:

- Positivas o divisorias, que definen formas convexas.
- Negativas o vaguadas, que definen formas cóncavas.

El solo dibujo de éstas, es ya una representación simplificada del relieve suficiente como para que el lector pueda conocer de forma aproximada el relieve de una zona o, incluso en muchos casos, puedan relevar el material del suelo por el que pasan, como ocurre con la representación del relieve mediante curvas de nivel.

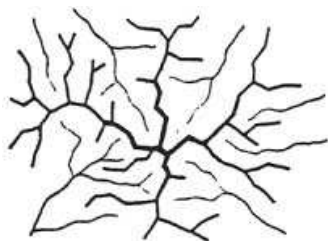


Ilustración 1.3.1: Sistema radial de hidrografía



Ilustración 1.3.2: Sistema de red

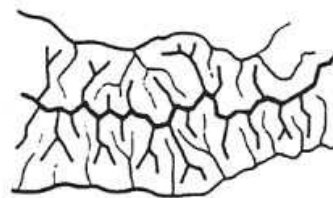


Ilustración 1.3.3: Sistema dendrítico

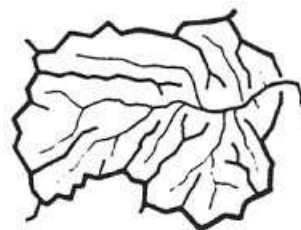


Ilustración 1.3.4: Sistema en forma de circo.

Las líneas estructurales pueden utilizarse bien como sistema de representación del relieve en sí, o bien como ayuda de otro sistema de representación del relieve.

#### 1.3.2. Ayuda en la representación del relieve

El trazado de las líneas estructurales del terreno es de gran ayuda en el dibujo de curvas de nivel, de sombreado, de normales, etc. La ayuda reside, básicamente, en su correspondencia en el terreno como líneas de ruptura de la continuidad del terreno, que servirán de guía en una representación más exhaustiva del relieve. Una vez realizado el dibujo, se suelen borrar para que no aparezcan en la representación final.

Por ejemplo, en el caso de una representación del relieve por medio de curvas de nivel, se dibujarían primero las líneas estructurales y se irían flexionando las curvas de nivel en base a éstas, eliminándolas posteriormente.

Las líneas de vaguadas son las más importantes en esta categoría, tanto que suelen representarse en todos los mapas que utilizan curvas de nivel. Puede decirse que la representación del relieve por curvas de nivel no está completa si no se dibuja también la red de drenaje, que ayuda mucho en la interpretación del terreno.

### 1.3.3. Las líneas estructurales como representación del relieve

En algunos casos puede interesar realizar una representación esquemática de la orografía, que sea fácil de entender y fácil de realizar. Esto se puede conseguir mediante el dibujo de las líneas estructurales de la zona, válido para escalas menores que 1:100.000.

Su realización consistirá en dibujar las divisorias y las vaguadas, y en completar la información indicando cimas, collados y las cotas y topónimos más importantes.

Para su representación normalmente se utilizan los siguientes criterios:

- Línea continua y gruesa para las divisorias. A veces, con trazo más grueso en función de su altitud.
- Línea fina para los ríos y vaguadas.
- Triángulos para las cimas. Pueden ser más grandes a mayor altitud.
- Corchetes invertidos para indicar los collados.



Ilustración 1.3.5: Representación mediante líneas estructurales de la zona del Mont Blanc (escala 1:200.000)

En zonas de alta montaña también se representan los límites de las nieves perpetuas y de los glaciares (en línea discontinua), y pueden representarse también caminos y algunas poblaciones importantes. Generalmente, todos los símbolos se realizan a un solo color, el negro.

El mapa resultante de este proceso (aunque más que mapa, se podría llamar croquis) suele utilizarse por excursionistas de montaña, en donde se presta este método útil para su empleo.

### 1.4. Las normales

Durante el siglo XIX se desarrolla este sistema de representación del relieve, consistente en utilizar líneas negras en la dirección de la máxima pendiente. Existen dos tipos de normales con objetivos claramente diferentes:

- Las normales de sombra.
- Las normales de pendiente.

El término utilizado en inglés y francés para estas pequeñas líneas, es "hachures", que significa "hachazos".



Ilustración 1.4.1: Representación del relieve por normales

Las normales de sombra nacen en Francia y buscan una representación cualitativa del relieve. Persiguen una buena imagen plástica del relieve sin aportar ninguna información cuantitativa. Para ello se considera el terreno iluminado bajo una luz oblicua, y se dibujan trazos con un grosor en función de la luz recibida. Se crea así un efecto de claroscuro a partir del cual los volúmenes del terreno son fácilmente perceptibles.

Las normales de pendiente por el contrario, buscan una representación métrica, cuantitativa. Igualmente, se crean claroscuros mediante las líneas, pero cuantificando mediante este efecto las pendientes del terreno.

Ambos métodos demuestran el mencionado dualismo de la representación cartográfica entre lo cuantitativo y lo cualitativo. El método de las normales de pendiente persigue una representación cuantitativa de los ángulos de pendiente, sacrificando para ello una buena impresión visual de la tercera dimensión del terreno. El método de las normales de sombra tiene un objetivo opuesto.



En la representación del relieve, las técnicas disponibles juegan un importante papel. Las aplicaciones del grabado sobre cobre disponibles en aquella época, no permitían la aplicación de medios tonos a los mapas sino basado en líneas. Así el método de las normales es un sombreado del terreno, realizado con los medios disponibles en la época.

### 1.4.1. Las normales de pendiente

Este método está íntimamente ligado al nombre de Lehmann, que hacia 1800 desarrolló un método de representación del relieve basado en lo siguiente. En un terreno sometido a una iluminación cenital, las superficies horizontales reciben la máxima cantidad de luz y las verticales la mínima. Cuanto más inclinado sea el terreno, menor es la luz que recibe por unidad de superficie, y por lo tanto, más oscura será su representación. Por lo tanto, a pendientes iguales en el terreno, les corresponderán oscuridades iguales en el mapa.

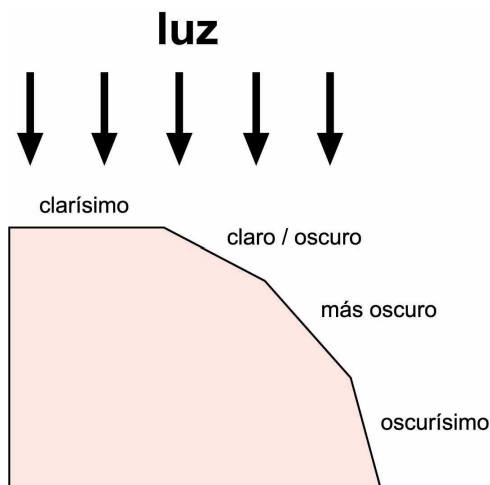


Ilustración 1.4.2: En las normales de pendiente se aplica una luz perpendicular al terreno

Esta variación de luminosidad de las pendientes en el mapa, se obtendrá variando el grosor de los trazos que forman las pendientes. Cuanto más gruesa sea la normal, más oscura será la representación y, por lo tanto, corresponderá a un terreno de mayor pendiente. Las normales de pendiente pueden analizarse conforme a cuatro características:

- Dirección: Todas las normales se dibujan en la dirección de máxima pendiente o dicho de otro modo, perpendiculares a las curvas de nivel, al menos dentro de lo posible.

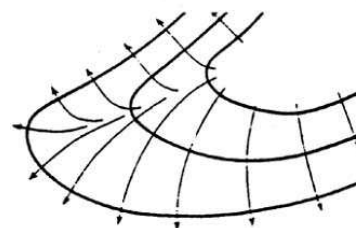


Ilustración 1.4.3: Curvas de nivel y líneas de máxima pendiente, las cuáles marcan la dirección del dibujo de normales



Ilustración 1.4.4: Dirección de las normales

- Espaciamiento: El sistema de Lehmann se basaba en un número constante de normales por cm, dependiente de la escala del mapa. La tabla siguiente se aplica en Alemania para los mapas de zonas que tienen pendientes comprendidas entre los 5° y los 40°.

Tabla 1.4.1

Escala	Nº normales por cm
1:25.000	20
1:50.000	26
1:100.000	38

- Longitud: Teóricamente la longitud se determina por la fórmula:

$$\text{Longitud} = K \cdot \cotag \alpha$$

Siendo K un intervalo determinado de altura, hoy sería la equidistancia de curvas y  $\alpha$  el ángulo de pendiente.

En la práctica, la longitud de las normales se basa en la impresión visual de pendiente. La mínima longitud de las normales se ha fijado en 0.2 – 0.3 mm.

- Grosor: En las áreas en las que Lehmann aplicaba este procedimiento, los máximos ángulos de pendiente eran de 45°. Por esta razón, la luminosidad de las normales variaba de blanco, cuando la superficie era horizontal, al negro cuando la pendiente era de 45°. Todas las pendientes intermedias se representaban con normales de diferentes grosores, creando así una proporción negro / blanco. Esta proporción estaba matemáticamente determinada por la fórmula:

$$\frac{N}{B} = \frac{\alpha}{45 - \alpha}$$

De esta manera, un ángulo de pendiente de 15° tendrá una relación negro / blanco de:

$$\frac{15}{45 - 15} = \frac{1}{2}$$

Por razones prácticas el intervalo de 0° a 45° de pendiente se divide en 10 clases, teniendo cada una de ellas su propio grosor basado en la proporción negro / blanco de su propia clase.

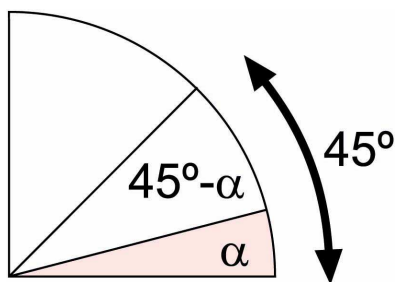


Ilustración 1.4.5: Relación gráfica para la superficie negra y blanca del mapa en función de la inclinación del terreno

Un relieve más o menos acusado requiere el desarrollo de otras escalas: por ejemplo, si la pendiente llega hasta 80° se determinarán otras clases que comportan unas nuevas relaciones negro / blanco, estando definidas por la fórmula:

$$\frac{N}{B} = \frac{\alpha}{80 - \alpha}$$

Tomando un número constante de normales para una escala determinada y la proporción de negro / blanco para los distintos ángulos de pendiente, el cartógrafo conocerá en qué grosor deben estar dibujadas las normales, como se ve en el ejemplo siguiente:

¿Qué grosor de normales debe aplicarse para representar una pendiente de 15° en un mapa de escala 1/25.000?

La proporción de negro / blanco para 15° es de 3/6, es decir, de cada cm del mapa 1/3 será negro y 2/3 será blanco. El número de normales es de 20 para esta escala luego el negro estará formado por 20 trazos; por lo tanto, cada trazo tendrá un grosor de 0,17 mm.

¿Qué grosor se utilizará para representar una pendiente de 30° en un mapa 1/50.000? Se podría seguir calculando, o deducirlo directamente del diagrama que para ello confeccionó Lehmann en 1867.

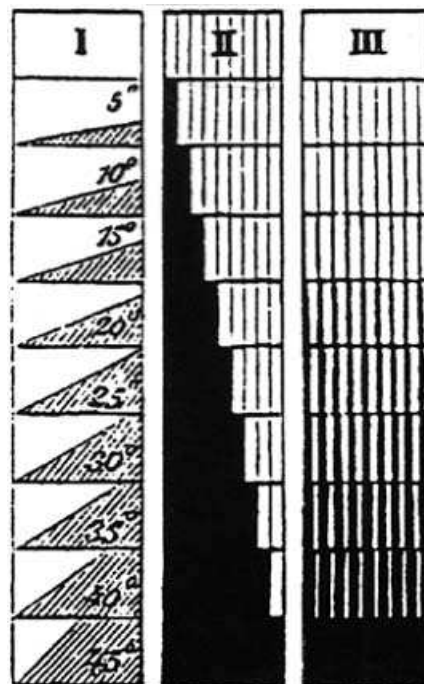


Ilustración 1.4.6: Diagrama de Lehmann, en donde I es el ángulo de pendiente, II la proporción negro / blanco en el mapa y III el grosor del dibujo de las normales

Esta bien claro que, como consecuencia de esta aplicación, laderas que tengan igual ángulo de pendiente tendrán la misma representación al margen de su orientación en el terreno. Es decir, las dos laderas de una montaña de igual pendiente, se representarían de forma idéntica. Para evitar que dos pendientes opuestas queden representadas visualmente como una sola pendiente, se deja una pequeña banda blanca entre ellas. A pesar de esto, queda sin resolver si la pequeña banda blanca es el fondo de un valle o una línea divisoria.

La ventaja de este método, es que supone un acercamiento a una representación métrica del terreno. Sin embargo, esta ventaja no ha podido superar las desventajas que acarrea su uso, como por ejemplo, la representación como una pendiente única las dos laderas de una montaña y no distinguir valles de divisorias.

Además, su realización es engorrosa, oscurece mucho el mapa y, por otro lado, no existe impresión visual de volumen.

#### 1.4.2. Las normales de sombra

En la técnica de las normales de sombra, la variación del grosor de las normales se utiliza para crear efectos de clarososcuros, los cuales son necesarios para ofrecer una impresión visual de la tercera dimensión.

Se supone una iluminación del terreno proveniente de la esquina superior izquierda del mapa (desde el noroeste), por lo que las pendientes de cara a la luz, serán las más claras. Por el contrario, las superficies orientadas al sureste serán las más oscuras.

En los mapas, la diferencia de iluminación se obtendrá utilizando líneas finas para la zona iluminada y gruesas para las menos iluminadas.

La ventaja más importante es que logra un buen efecto visual, facilitando la comprensión de la distribución del terreno en la zona cartografiada.

La desventaja más importante de este método es la falta de carácter métrico en la representación del relieve. Por otro lado, al igual que en el sistema de normales de pendiente, es un sistema engorroso de llevar a cabo, y oscurece mucho el mapa. Esto último se mejoró en algunos mapas, con el dibujo en siena de las normales de sombra.

En las imágenes siguientes, se representa el relieve mediante normales de pendiente y normales de sombra para una misma zona. Se pone así de manifiesto la mejoría en la representación del volumen utilizando las normales de sombra. En las técnicas de representación por normales de sombra, la dirección, el espaciamiento y la longitud de la normal es idéntica que en el método de las normales de pendiente.



Ilustración 1.4.7: Representación mediante normales de pendiente



Ilustración 1.4.8: Representación mediante normales de sombra

### 1.4.3. Normales simplificadas

El sistema de normales de pendiente descrito con anterioridad, se aplicó solamente en las grandes escalas, y está hoy totalmente obsoleto. La introducción de las curvas de nivel supera con creces esta técnica cuantificadora del relieve.

La aplicación del método de normales de sombra es diferente. No sólo se aplicaban en mapas de grandes escalas, sino también en pequeñas escalas, por ejemplo, sobre atlas. Esta última aplicación, ha continuado hasta el momento actual, eso sí, de una forma muy libre sin tener en cuenta los estrictos condicionantes de longitud y espaciamiento.

Todavía se puede encontrar en los atlas la representación de montañas mediante el uso simplificado de las normales de sombra. Se representan las grandes formas del relieve, obteniendo una imagen muy generalizada de la realidad. Este sistema de simplificación se llama también sistema “de la oruga” o “rama de pino”.

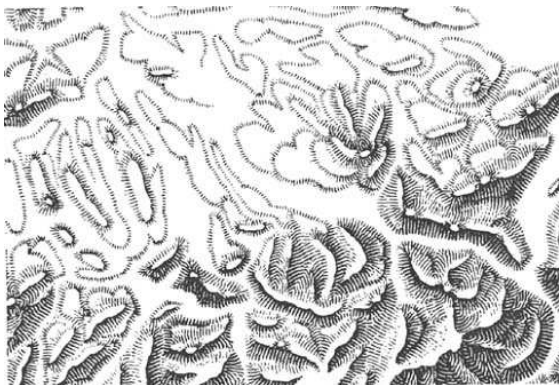


Ilustración 1.4.9: Representación por medio del sistema de la oruga o rama de pino

### 1.4.4. La utilización actual de las normales

A pesar de que nuevos sistemas han perfeccionado la representación del relieve en las dos dimensiones del papel, todavía aún, hay un hueco para la utilización de estos métodos.

Hay elementos en el terreno, cuya representación mediante curvas de nivel resultaría confusa.

Esto ocurre, por ejemplo, con las formas geométricas del terreno, debidas a la mano del hombre, incluso a grandes escalas, como los desmontes y los terraplenes. Igualmente, en la representación de algunas formas naturales del relieve, como por ejemplo, las dunas, dolinas, cráteres, efusiones de lava... En estos casos, aún hoy en día se utilizan las normales.



Ilustración 1.4.10: Terraplén (1) y Desmonte (2)



Ilustración 1.4.11: Dolinas

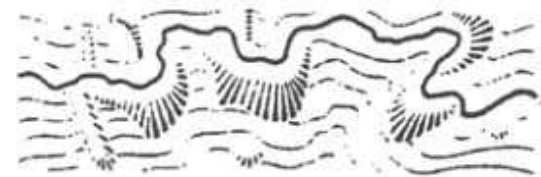


Ilustración 1.4.12: Deslizamientos



Ilustración 1.4.13: Dunas

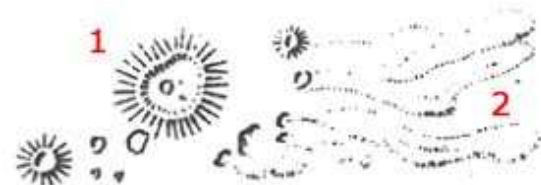


Ilustración 1.4.14: Formas volcánicas: Cráter (1) y Corrientes de lava (2)

También se puede adelantar que el dibujo de roquedo o escarpado, que se realiza en la actualidad para el dibujo de algunas formas del terreno, es un dibujo que evoca la apariencia real de estos elementos mediante el uso de las normales. Este recurso bien utilizado proporciona resultados muy satisfactorios. En cualquier caso, la combinación de las curvas con las normales ha de ser coherente. Así cuando las normales reemplacen a las curvas, estas últimas deberán eliminarse.

Por ello, los puntos acotados en los mapas se utilizan en combinación con otros sistemas. Así por ejemplo, su utilización en la representación del relieve mediante curvas de nivel es fundamental, ya que informan sobre las altitudes de puntos característicos del terreno.

En cualquier caso, hoy en día, cualquier método de representación del relieve se basa en el conocimiento de la altitud de una serie de puntos, aunque no todos ellos se representen después en el mapa.

### 1.5. Puntos acotados

Los puntos acotados son puntos con posición y altitud numérica indicada, sobre o bajo un nivel de referencia determinado. No tienen por qué existir sobre el terreno, aunque existan excepciones como los vértices de triangulación, las señales de nivelación de alta precisión, etc.

Estos puntos dan información ortogonal y precisa de las diferentes altitudes de los puntos, pero, sin embargo, no es frecuente su sola utilización para la representación de las formas del relieve. Por un lado, la abundancia de puntos necesarios sería tal que no permitiría la representación de otros detalles planimétricos y, por otro, no proporcionan una visión del relieve de la zona, aunque lo definan desde un punto de vista geométrico.

#### 1.5.1. El datum

Antes se ha señalado que los puntos acotados son puntos con altitud sobre o bajo un nivel de referencia, sin hacer mención a cuál es ese origen de altitudes.

El origen o cota cero, es el denominado datum. En la mayoría de los países se toma como tal el nivel medio del mar (se hace coincidir con la superficie del geode). Los países que no tienen mar, transfieren esta cota cero por medio de una nivelación de precisión, desde países vecinos en las costas. Así por ejemplo, el datum de Suiza se basa en el nivel medio del mar en Marsella (Francia). Sin embargo, existe cierta descoordinación entre los datum de distintos países, dando lugar a algunas diferencias.

Tabla 1.5.1

En metros	Bélgica	Holanda	Alemania	Suiza	Italia
Bélgica	-	2.31	2.29	2.23	1.98
Holanda	-2.31	-	-0.02	-0.08	-0.33
Alemania	-2.29	0.02	-	-0.06	-0.31
Suiza	-2.23	0.08	0.06	-	-0.25
Italia	-1.98	0.33	0.31	0.25	-

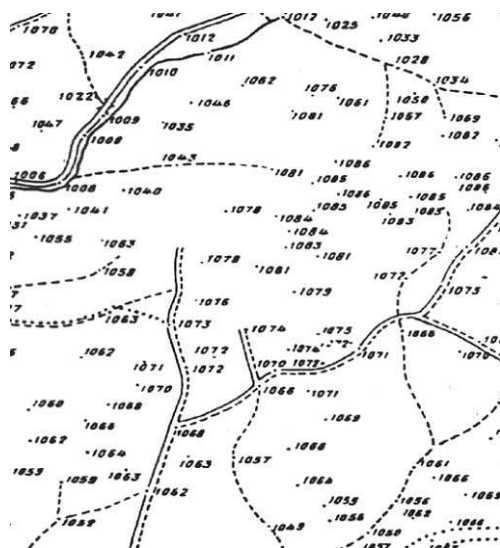


Ilustración 1.5.1: Definición del relieve mediante el solo uso de puntos acotados

Las diferencias mayores, entre Bélgica y Holanda de 2.31 m se explican por una diferente definición del término “nivel medio del mar”. Bélgica ha definido su datum como el nivel medio del agua más baja en las mareas de primavera. Holanda, como el nivel medio del agua más alta.

Las demás diferencias observadas son del orden de los 30 cm. Estas diferencias serán relevantes en grandes escalas, estando la mayoría de las diferencias dentro de la precisión del dibujo, por lo que no supondrá un problema importante en la cartografía. Tendrá importancia en los mapas que cartografíen zonas fronterizas, ya que las cotas de los mapas realizados por distintos países (para las mismas zonas a las mismas escalas), diferirán lo que su datum.

**1.5.2. Precisión de los puntos acotados**

La precisión de la cota de un punto estará condicionada por la forma en que fue determinada su altitud. Así se podrán tener precisiones del milímetro (nivelaciones de precisión), del centímetro (puntos de triangulación y de apoyo) o del decímetro y del metro (puntos de cota).

Sin embargo, la precisión altimétrica con la que se represente el punto acotado en el mapa, dependerá de otro factor importante: la escala.

Un punto determinado con la precisión del mm en un mapa de escala pequeña podrá aparecer con sólo la especificación del metro; en uno de mediana escala con la del dm; y en uno de gran escala se representará con todas sus cifras.

**1.5.3. Naturaleza y densidad de los puntos acotados**

Mejor que la superabundancia de puntos acotados en el mapa, es la correcta situación de éstos. Un punto acotado no identificable en el terreno no tiene ningún valor, por lo que mejor será no incluirlo en el mapa final.

Ejemplos de puntos acotados bien seleccionados son: las cumbres, los collados, las confluencias de ríos, de carreteras...; inicios y finales de valles, de terrazas; los puntos más bajos de depresiones...

Además, en escalas grandes también serán representativos: el centro de un puente, una casa aislada, el cruce de calles, plazas... Todos estos tienen en común que el punto es característico e identificable en el terreno.

Por lo tanto, si la selección es buena, no es necesario fijar una densidad de puntos acotados estándar para los mapas. No obstante, el profesor suizo Imhof, recomienda orientarse según la siguiente tabla.

Tabla 1.5.2

Escala del mapa	Nº aproximado de puntos acotados por cada 100 cm <sup>2</sup>
1/25.000	30
1/50.000	40
1/100.000	40
1/200.000	30
1/500.000	30
1/1.000.000	40

Sin embargo, la mayoría de los mapas europeos, sólo alcanzan la mitad de las densidades aquí recomendadas, aproximadamente. Como norma general, ocurrirá que en zonas montañosas será necesario un número de puntos mayor, que para zonas llanas.

Sobre los puntos, en la Norma del MTN sólo se dice que “deberán facilitar la lectura del terreno” y que “deberán ser fácilmente identificables”. Por lo tanto, la realización una buena selección de los puntos acotados que deberán aparecer en el mapa, es más una cuestión de sentido común y buen hacer que la simple aplicación de una fórmula o de una regla determinada.

**1.5.4. Simbolización**

Los puntos acotados ordinarios se indican en casi todos los mapas topográficos con un punto pequeño. Los que tengan una cualidad especial, como los vértices de triangulación o los puntos de nivelación tienen una simbolización diferente, tal y como se muestran a continuación.








Vértices	Puntos de nivelación	Puntos de apoyo	Punto de cota
 675.35	 675.35	 675.35	
 675.35		 675.3	
 675.35			 675

Ilustración 1.5.2

En lo que se refiere al color del punto acotado, el negro es el estándar, tanto del símbolo como del dígito del valor. Para los puntos que hagan referencia del agua, se utiliza el azul.

La colocación del símbolo respecto de la rotulación puede ser a la izquierda del rótulo, a una distancia de dos veces la separación de los números y colocado en el eje del rótulo, o bien, en su parte inferior izquierda.

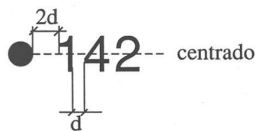


Ilustración 1.5.3



Ilustración 1.5.4

## 1.6. Curvas de nivel

La curva de nivel, también llamada isohipsa, es una curva imaginaria que une los puntos de la superficie terrestre que tienen la misma altitud, sobre o bajo, un determinado nivel de referencia. Estas curvas, son los elementos gráficos más importantes en la representación cuantitativa del relieve, y son además la base para la realización de otros sistemas.

La curva de nivel batimétrica es la línea imaginaria que une puntos del fondo de una superficie cubierta de agua (mar, lago, río) que tienen la misma distancia vertical a la superficie de las aguas.

Las ventajas de la utilización de las curvas son su capacidad de representar cuantitativamente el terreno (precisión métrica), además de proporcionar una relativa imagen cualitativa del mismo, aunque sólo es identificable por aquellos que están acostumbrados a este tipo de representación.

### 1.6.1. Obtención de las curvas

La obtención de las curvas puede realizarse mediante métodos de topografía clásica y mediante la restitución fotogramétrica. En el primer caso, se consiguen a través de interpolación lineal de las curvas a partir de una gran cantidad de puntos con altitud conocida. En el segundo, se obtienen directamente del modelo, grabándose en forma digital. Hoy en día, también pueden obtenerse mediante modelos digitales del terreno, utilizando programas informáticos adecuados que interpolan automáticamente las curvas.

### 1.6.2. Intervalo entre curvas de nivel

La distancia vertical que separa a dos curvas de nivel sucesivas se llama intervalo. En un mismo mapa este intervalo suele ser constante y en este caso se le llama "equidistancia" de las curvas de nivel.

La elección de un buen intervalo de curvas de nivel es muy importante, pues la percepción cualitativa y cuantitativa dependen de él. Es realmente cierto que la elección de un intervalo muy pequeño dará más precisión al relieve representado, sin embargo, oscurecerá el mapa e impedirá la representación de otros detalles topográficos.

La selección del intervalo es un delicado proceso en el que intervienen varios factores como:

- La escala del mapa.
- El tipo de superficie.
- El propósito del mapa.
- Consideraciones de tipo económico.
- La información disponible.
- El proceso aplicado en la obtención.
- Las limitaciones en la reproducción gráfica.

La tabla adjunta ofrece algunas recomendaciones, que pueden orientar acerca de la elección de una buena equidistancia en función de la escala y el tipo de terreno. Debe hacerse notar que estos valores se refieren a mapas topográficos de muy alta calidad, de países industrializados con un índice de población alto, en los que se necesita una información muy detallada de la topografía del terreno.

Tabla 1.6.1

Intervalos recomendados (en metros)

Escala	Alta montaña	Baja montaña	Tierras bajas y colinas
1:10.000	10	5	2
1:25.000	20	10	2,5
1:50.000	20-25	10-20	5
1:100.000	50	25	5-10
1:250.000	100	50	10-20
1:500.000	200	100	20
1:1.000.000	200	100	20-50

Para calcular el mínimo intervalo posible de las curvas de nivel en un mapa, deberán tenerse en cuenta los siguientes factores:

- La escala del mapa.
- La máxima pendiente a representar mediante curvas de nivel.
- El grosor mínimo de línea para que ésta sea visible.

Siendo el número de curvas de nivel por milímetro K y la escala del mapa 1/S, la distancia entre dos curvas de nivel en el terreno es, en metros:

$$\frac{S}{1000 \cdot K}$$

Si se considera un ángulo de pendiente  $\alpha$ , este valor representará una distancia vertical en metros de:

$$\frac{S}{1000 \cdot K} \cdot \tan \alpha$$

Ejemplo: Si se considera que, para una óptima legibilidad, el mínimo grosor de la línea es de 0,1 mm y que la mínima separación entre curvas es de 0,4 mm, entonces, se podrán representar dos curvas de nivel en cada milímetro del mapa (K=2).

Si el mapa es de escala 1:50.000 y el terreno tiene una pendiente de 45 grados se tendrá:

$$\frac{50.000}{1.000 \cdot 2} \cdot \tan 45 = 25$$

Sin embargo, esta fórmula no es infalible. En los mapas de gran escala, los valores de intervalo, en la práctica, son mayores que los calculados en la fórmula. Por el contrario, en los mapas de pequeñas escalas, los valores del intervalo son menores que los calculados por la misma fórmula.

Por ejemplo, a escala 1:1.000.000 el valor tomado en la práctica es de 200 m para las altas montañas mientras que con la fórmula se obtiene que, para ángulos de 45°, el intervalo óptimo es de 500 m.

Hay que recalcar que, como tantas veces ocurre en la representación cartográfica, la selección de un intervalo no es la simple aplicación de una fórmula.

### 1.6.3. Curvas intercaladas

A pesar de la teoría (que dice que en un mapa se debe utilizar una única equidistancia), en la práctica ocurre que a menudo se necesitan varios valores de equidistancia. Y es debido a que el intervalo seleccionado, puede no ofrecer una información adecuada. Esto ocurre particularmente para las zonas más llanas, en donde la separación entre curvas es muy ancha. Se pueden, entonces, necesitar dos intervalos: uno para las zonas llanas y otro mayor para las accidentadas, como puede ocurrir en la siguiente figura.



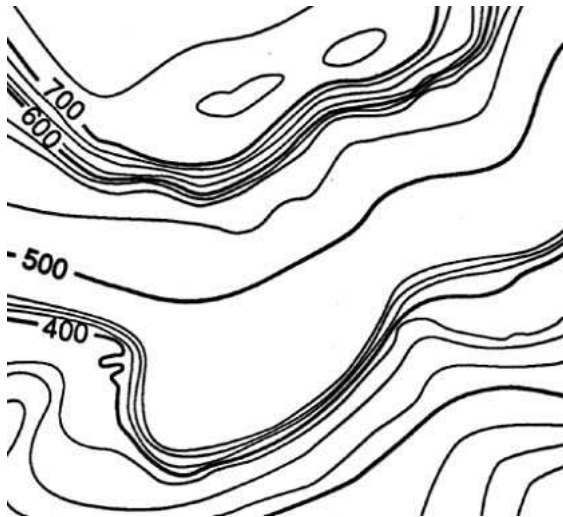


Ilustración 1.6.1

En esta figura, la equidistancia es de 25 m. Existe un salto de pendiente muy visible entre los 375 y los 475 m y entre los 550 y los 700 m. Una pendiente suave discurre entre los 475 y los 550 m. Puesto que esta zona no queda del todo bien representada, se podrían introducir dos equidistancias diferentes. El resultado sería parecido a la figura siguiente.

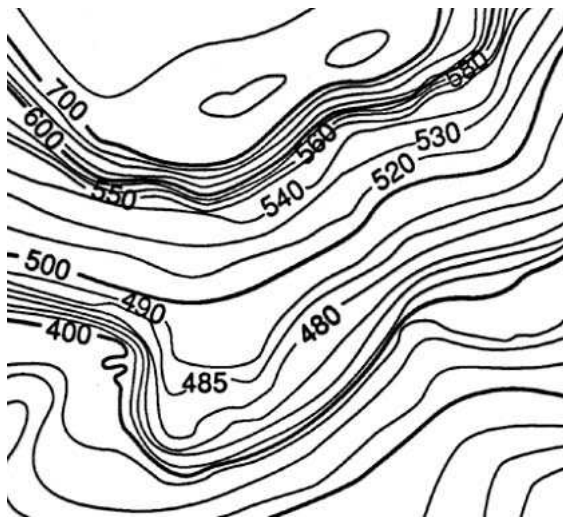


Ilustración 1.6.2

En esta imagen, las suaves pendientes han desaparecido visualmente al utilizar de forma inadecuada dos intervalos distintos. Solamente un detallado análisis de la numeración pone de manifiesto (no sin cierto esfuerzo) la forma del terreno. Por lo tanto, si la equidistancia es demasiado grande como para representar suficientemente algunas zonas del terreno, se evitará siempre utilizar dos intervalos diferentes. Esta información, se ofrecerá mediante las curvas intercaladas.

Las curvas intercaladas son curvas de carácter local, que se utilizan cuando la equidistancia del mapa es demasiado grande como para representar las variaciones de altitud en las zonas más llanas. Su objetivo es, por tanto, mostrar un cierto fenómeno que se considera interesante y que pasaría desapercibido de otra forma.

Las curvas intercaladas o auxiliares se insertan entre las normales, y no están dibujadas en la totalidad de la superficie del mapa. Comienzan y terminan allí donde sea necesaria una información más detallada para definir el terreno (a veces de unos pocos centímetros).

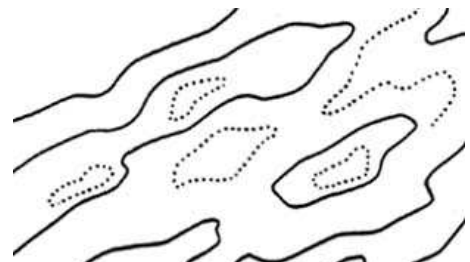


Ilustración 1.6.3

Es importante recalcar que una curva intercalada que coincida con la interpolada entre un par de curvas de nivel, no aportará ninguna información adicional, por lo que no sería necesario su uso. Sin embargo, cuando la pendiente entre dos curvas de nivel muy espaciadas tenga un gradiente no lineal, su representación será importante.

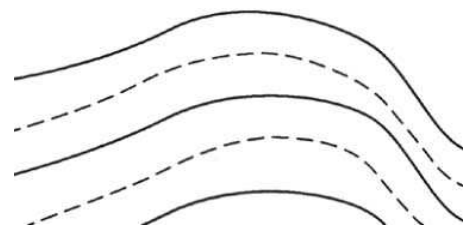


Ilustración 1.6.4: El intercalado de curvas es irrelevante, puesto que coinciden con las interpoladas

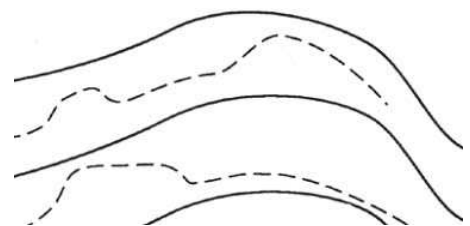


Ilustración 1.6.5: Estas curvas, sin embargo, aportan una información adicional necesaria para zonas muy llanas

Tras lo anterior, parece evidente que para la localización de una curva intercalada en el mapa, será necesario disponer de datos numéricos que garanticen su forma exacta.

En cuanto a su simbolización, se deberán distinguir de las curvas de nivel normales (para que no ocurra lo que en el ejemplo anterior, en el que visualmente no se distinguen las variaciones de las pendientes). Así se elegirá un símbolo diferente para estas curvas, que podrán ser líneas más finas, a trazos o a puntos.

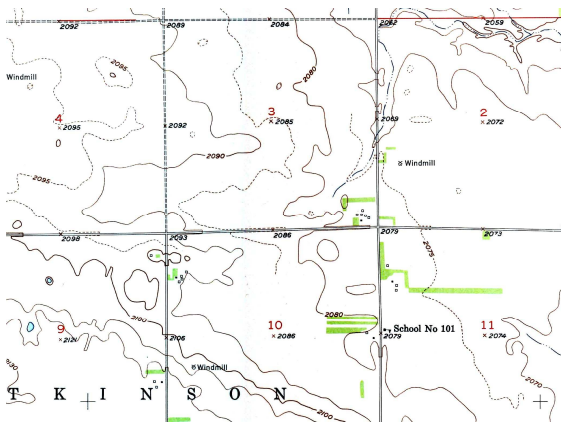


Ilustración 1.6.6: USGS. Escala 1/24.000.

#### 1.6.4. Curvas maestras

La curva maestra es una curva normal representada con un grosor mayor que las demás con el fin de dar mayor legibilidad al conjunto de curvas representadas.

Las curvas maestras se repiten en cantidades múltiples de la equidistancia.

Habitualmente, se dibujan curvas maestras cada cuatro o cinco curvas, pero no es una regla general; basta que el intervalo sea un número fácil de operar, fácil para sumar y restar, fácil para interpolar, etc.

#### 1.6.5. Curvas de depresión

En ciertos terrenos los cambios de pendiente se producen de manera brusca y puede suceder que la representación de las curvas no sea suficiente para determinarlo. Por eso, cuando se produce una depresión (simas, pozos, cráteres...), se identifica por el distinto signo del dibujo que, generalmente, se hace añadiendo pequeños trazos perpendiculares a la línea de la curva dirigidos en la dirección del punto más bajo. El trazo de la curva de depresión es de línea continua generalmente, aunque a veces se dibuja también a trazos.

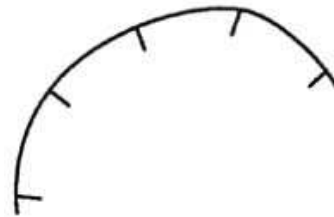


Ilustración 1.6.7

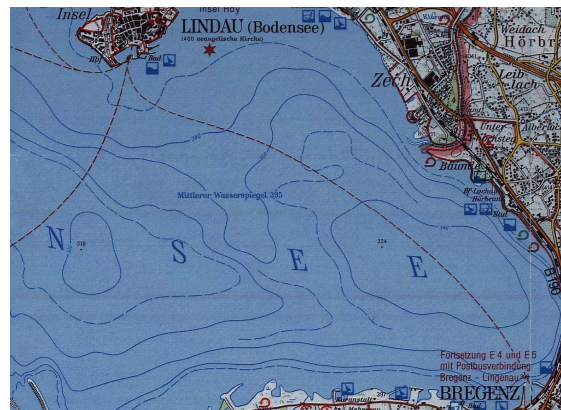


Ilustración 1.6.8: Carta topográfica alemana. Escala 1/50.000.

#### 1.6.6. Selección de los valores de las curvas de nivel

Si la cuestión del tamaño del intervalo de las curvas de nivel se ha solucionado, la cuestión sobre los valores de las curvas de nivel que deben dibujarse es de fácil respuesta: las curvas de valores fáciles, redondos. Deben ser fáciles de sumar y restar, fáciles para interpolar linealmente... Con un intervalo constante de 25 m serán prácticos los siguientes valores, 100 - 125 - 150 - 175 - 200... y no lo serán los valores como 107 - 132 - 157 - 182 - 207...

### 1.6.7. El color

Está generalmente aceptado que las curvas de nivel se impriman en siena. Un análisis de los mapas topográficos existentes, demuestra que se han aplicado diferentes tonos marrones, algunos muy pálidos que hacen que las curvas de nivel sean poco legibles.

Algunos Servicios Topográficos aplican un color naranja (Reino Unido, Nueva Zelanda, Gambia). Aunque la legibilidad de este color es buena, en zonas con un fuerte relieve, el color naranja se hace muy dominante.

En Suiza se aplica un complejo sistema de curvas de nivel, que resulta muy eficaz:

- Marrón para las curvas que discurren en vegetación y suelo.
- Negras para curvas de nivel sobre zonas rocosas.
- Azul para curvas situadas sobre zonas permanentemente cubiertas de hielo y nieve, y también para las isobatas.

Aplicando este sistema de color, las curvas de nivel cambian de color dependiendo del tipo de terreno que atraviesan, con lo que se aumenta el nivel de información del mapa, sin recargarlo.



Ilustración 1.6.9: Carta nacional de Suiza. Escala 1/50.000.

### 1.6.8. El grosor

El grosor de las curvas de nivel es un factor importante en la representación gráfica.

Es sabido que las curvas maestras presentan un grosor mayor que las curvas normales.

El grosor de las curvas de nivel debe determinarse por los tres tipos de líneas distintas que deben diferenciarse. Los siguientes valores deben tomarse como aproximaciones de valores estándar:

- Curvas maestras: 0.2 mm y línea continua.
- Curvas normales: 0.1 mm y línea continua.
- Curvas intercaladas: 0.05 mm y línea continua; ó 0.1 mm y línea discontinua o de puntos.

Si las curvas de nivel se van a reproducir en más de un color, hay que hacer otra consideración acerca del grosor. Puesto que el color influye en la percepción del grosor de las líneas, el grosor de las líneas debe ser modificado para compensar esa impresión. El profesor Imhof sugiere que si tomando como grosor normal el del color siena, el azul debe ser el 80% y el negro hasta un 65% de dicho grosor.

Se recomiendan las siguientes especificaciones para un mapa topográfico 1:50.000 en mm:

Tabla 1.6.2

	Siena	Azul	Negro
C. maestras	0.15-0.20	0.12-0.18	0.10-0.15
C. normales	0.07-0.12	0.16-0.10	0.05-0.08
C. intercaladas	0.05	0.04	0.03

### 1.6.9. La rotulación

El valor cuantitativo de las curvas de nivel debe estar visible, mostrándolo junto con la propia curva. Es práctica común, para conseguir lo anterior, insertar el valor en un hueco que se hace en la curva de nivel. Otras soluciones, como por ejemplo situarlo encima o debajo de la curva, o solamente en el borde de la hoja, deben considerarse como soluciones pobres.

Otras cuestiones a responder conciernen a la orientación del número que indica el valor: horizontalmente, verticalmente... No hay nada estrictamente ordenado a este respecto, sin embargo, en la práctica se toman dos posturas diferentes.

Por un lado, colocar los textos de tal forma que se puedan leer las cifras en la misma dirección en la que sube el terreno, según se mira el mapa en la posición normal de lectura (la cabeza del número se dibujará hacia la parte más alta del terreno y los pies del número estarán hacia la parte más baja del terreno). De esta forma, la dirección de subida o bajada de la pendiente de un terreno no solamente se observa mirando la dirección de crecimiento de las curvas sino también observando una sola cifra de las curvas maestras.

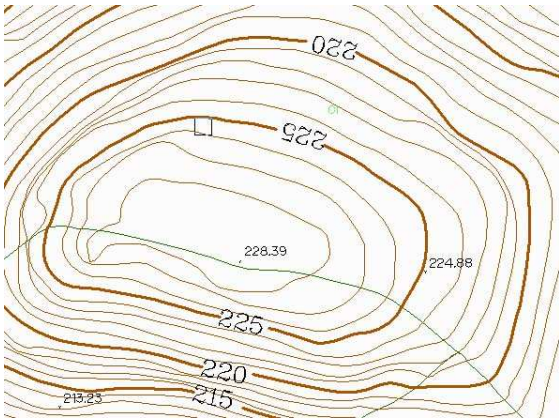


Ilustración 1.6.10

Otra postura es la que atiende únicamente a las reglas de legibilidad estudiadas anteriormente.

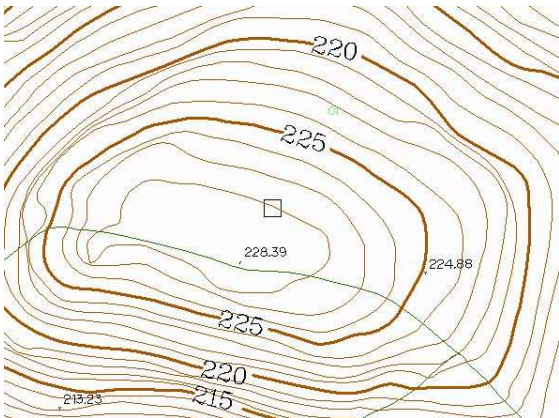


Ilustración 1.6.11

Respecto a la distribución de los valores a lo largo de las curvas también existen opiniones diferentes. Por un lado, se intenta distribuir los valores de forma homogénea. Se pretende así agilizar la lectura de las altitudes de cualquier punto del mapa.

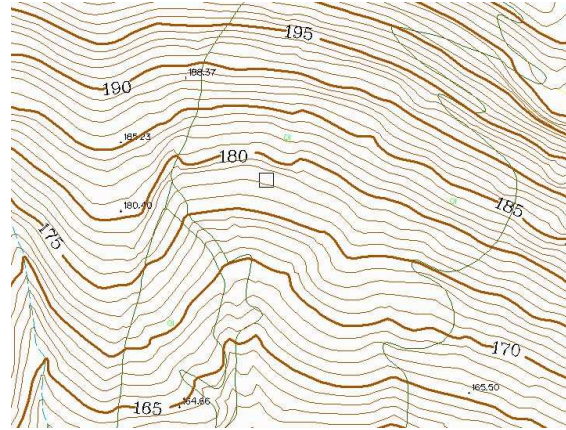


Ilustración 1.6.12

Otra tendencia es disponer los textos formando columnas que se repiten en varias partes de la hoja.

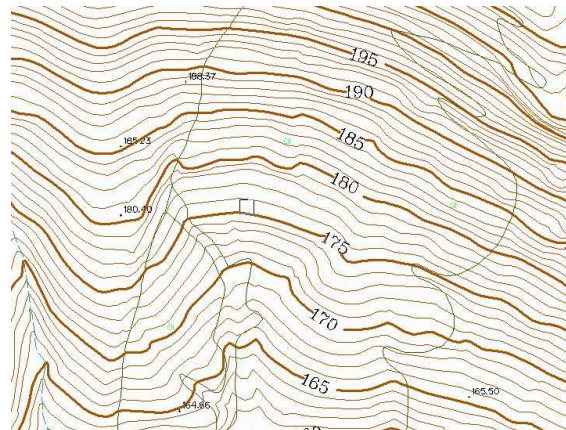


Ilustración 1.6.13

La alternativa sólo tiene solución si se observa el mapa desde el punto de vista del usuario. En este caso, la primera solución es la más adecuada, ya que permite fácilmente la determinación de las alturas de cualquier punto, sin tener que seguir las curvas desde el emplazamiento de las columnas de los números hasta el lugar elegido. Sin embargo, deben situarse suficientes números de cota en las curvas y repartidos homogéneamente para que la ventaja se cumpla.

En ambos casos, también los puntos acotados (vértices, puntos de nivelación de precisión, etc.) ayudan al usuario.

### 1.6.10. Variaciones sobre las curvas de nivel

Existen varias modificaciones que, siendo cercanas a las curvas de nivel, tienen la suficiente entidad para citarlas pero no para hacerlo por separado y son:

- Las curvas de configuración.
- Las curvas sombreadas.

Las curvas de configuración fueron un precedente de las curvas de nivel. Son curvas croquizadas con las que se intentaba producir la sensación de relieve. La mayor densidad de curvas indica mayor pendiente y la diferencia de grosor sólo pretende obtener un buen efecto plástico. No existe el concepto de equidistancia y la curva es un recurso artístico sin métrica alguna. Aunque no se utilizan, son, aún hoy día, un excelente método de croquización altimétrico.

Se utilizaron en mapas del siglo pasado cuando la obtención rigurosa de las curvas era imposible.



Ilustración 1.6.14: Curvas de configuración

Las curvas sombreadas son curvas de nivel a las que se les añade un efecto de sombras. Pretenden una mejor representación del relieve que ayude a una más rápida y mejor comprensión de las formas.

Parten del principio de que el terreno no es continuo sino que cada curva de nivel es una capa independiente de las demás (al igual que una maqueta sin terminar).

Al modelo se le ilumina con luz que proviene del borde superior izquierdo del papel y tiene una dirección aproximadamente noroeste y una inclinación de 45 grados.



Ilustración 1.6.15: Curvas sombreadas

Bajo estas condiciones pueden darse dos soluciones al dibujo:

- La primera, menos exagerada, consiste en dibujar finas las curvas iluminadas y más gruesas las que están a la sombra, aumentando el grosor del trazo cuanto mayor sea la sombra.
- La segunda, iluminar la zona donde existe luz y oscurecer la zona donde se producen las sombras. En este caso, es preciso un fondo de color para que se vean las partes iluminadas de las curvas.

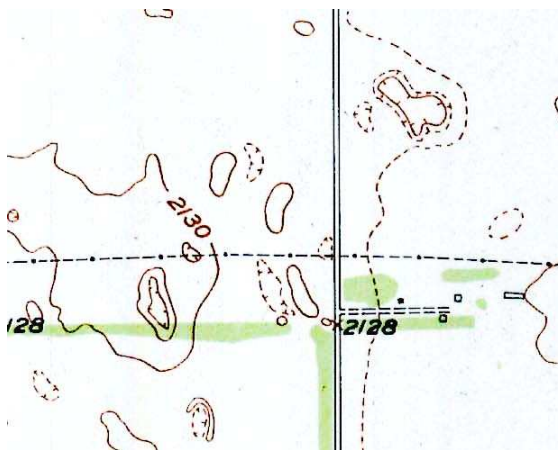


Ilustración 1.6.16: Ejemplo con curvas maestras, curvas normales, curvas de depresión, curvas intercaladas y curvas intercaladas de depresión. USGS. Escala 1/24.000.

### 1.7. Dibujo de roquedo

Al contrario que en el caso de las curvas intercaladas, puede ocurrir que la equidistancia de curvas sea demasiado pequeña para la representación de ciertas zonas: escarpados, pendientes pronunciadas e irregulares... Además, otras formas del relieve, como las viseras no tienen una representación expresiva ni legible mediante el dibujo de curvas.

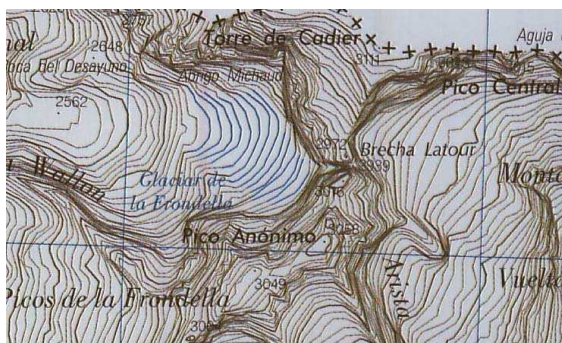


Ilustración 1.7.1: IGN. Escala 1/25.000.

En el siguiente ejemplo, se muestran cuatro opciones sobre la representación de una visera mediante curvas de nivel.

En la opción A, las curvas se mantienen tal y como corresponderían. En el resultado es difícil entender algo:

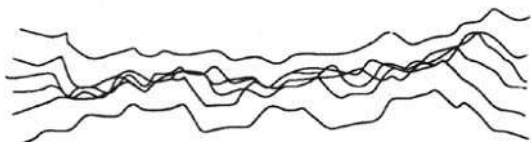


Ilustración 1.7.2: Opción A

En la opción B, se han interrumpido las curvas que están por debajo del saliente rocoso, en línea más gruesa:

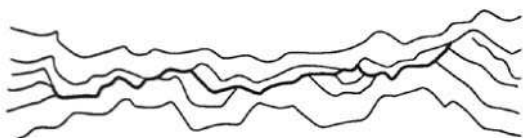


Ilustración 1.7.3: Opción B

En la opción C, se utiliza el mismo recurso sin especificar el saliente, que viene dado por las interrupciones de las curvas:

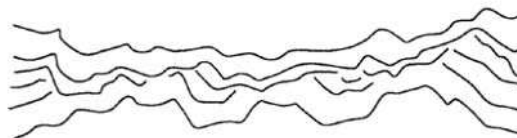


Ilustración 1.7.4: Opción C

Por último, en la opción D, se ha optado por utilizar un dibujo más limpio de las curvas a base de separarlas entre sí:

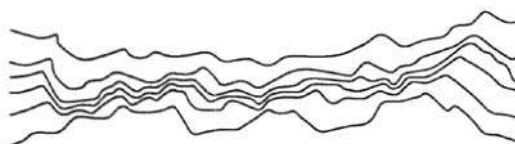


Ilustración 1.7.5: Opción D

Puesto que la legibilidad de estos resultados sólo es buena para la opción D, para representar este tipo de relieves se podrían tomar dos posturas:

- Separar las curvas el mínimo posible, obteniendo así una imagen legible del terreno. No obstante, con ello se está falseando el carácter métrico de las curvas de nivel, ya que se ha suavizado el relieve de la zona representada (opción D).
- Será mejor adoptar una segunda postura, consistente en sustituir el dibujo de curvas por una representación expresiva de estas zonas, eliminando el carácter métrico, tan difícil de dar en estos casos, y representarlas mediante el dibujo de roquedo.

El dibujo de roquedo, es una representación estilizada de las pendientes irregulares y de los afloramientos rocosos, que a pesar de no proporcionar una información cuantitativa, resulta muy expresiva cuando está bien realizado.

Para obtener su dibujo, se siguen criterios parecidos a los utilizados en las normales de sombra. Es decir, en las "zonas de sombra" las líneas serán más gruesas, normalmente en color negro. Se podría basar en fotografías aéreas, en datos de levantamientos de campo, etc., para realizar este tipo de representación.

Como se ha mencionado, las curvas de nivel deberán interrumpirse en el caso de utilizar este recurso. No obstante, se podrán mantener las curvas maestras encima del dibujo, eso sí en color negro.

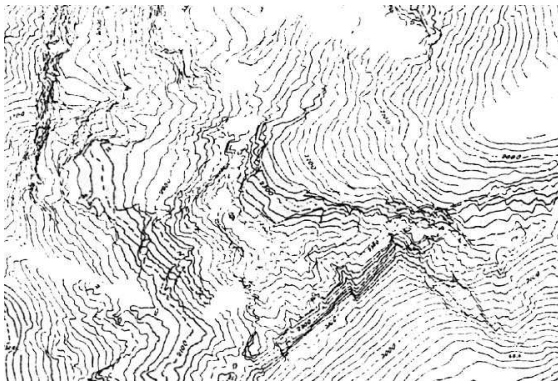


Ilustración 1.7.6: Las curvas de nivel no pueden representar de forma legible las zonas difíciles del terreno. En este caso, es mejor utilizar el dibujo de roquedo



Ilustración 1.7.7: Es mejor interrumpir el dibujo de curvas si vamos a utilizar el roquedo. Las maestras, normalmente se mantendrán

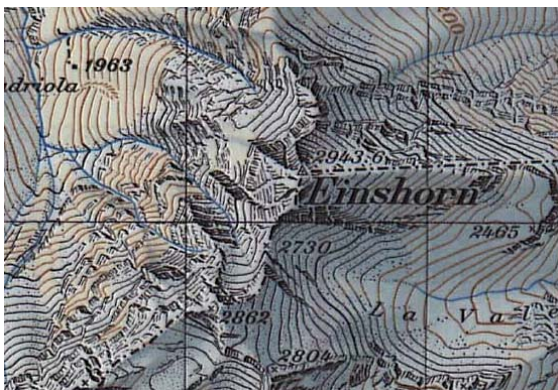


Ilustración 1.7.8: Ejemplo de utilización de roquedo. Carta nacional de Suiza a escala 1/50.000.

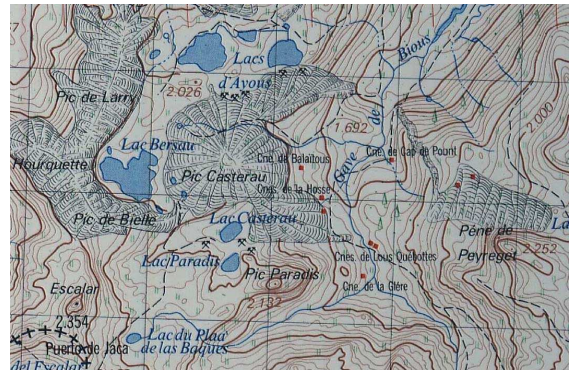


Ilustración 1.7.9: Pirineos franceses. SGE. Escala 1/50.000.

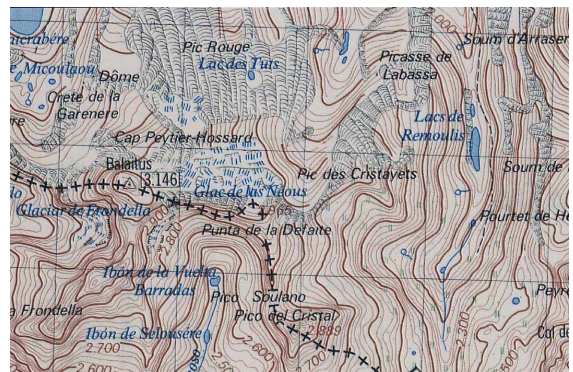


Ilustración 1.7.10: Pirineos franceses. SGE. Escala 1/50.000. Representación de roquedo y de glaciar en color azul.





## 2. El relieve de elementos superficiales

### 2.1. Sombreado

El sombreado es un sistema de representación del relieve que, si bien no aporta una imagen métricamente precisa del mismo, es muy útil en la ayuda de la comprensión de las formas del terreno. Ofrece una imagen tridimensional que no es comparable a las obtenidas por otros sistemas. Por ello, es utilizado en muchos mapas de distintas escalas, combinado con otras formas de representación del relieve, facilitando así la transmisión de la información topográfica al lector del mapa.

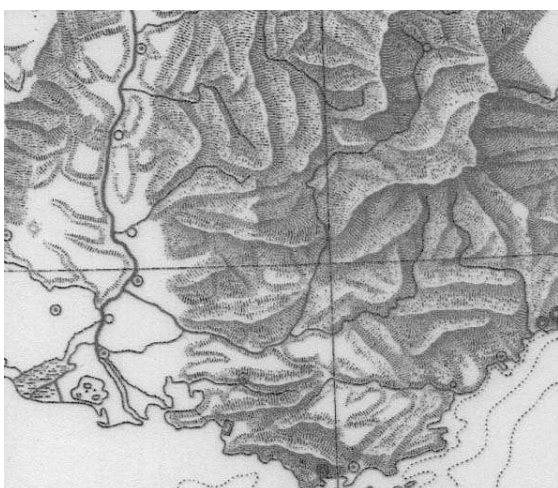


Ilustración 2.1.1

El método consiste en utilizar distintos valores de gris que permitan crear los efectos de claroscuros necesarios para obtener una imagen tridimensional en un soporte bidimensional. El sombreado ha sido utilizado en mapas manuscritos desde hace mucho tiempo, aunque por carecer de medios de impresión suficientes no aparecen en mapas impresos hasta épocas recientes. De hecho, se podría pensar que el método de las normales deriva de la intención de sombreado utilizando los medios disponibles en la época.

Como ocurría con las normales, también existe en el sombreado una doble intención: por un lado, la representación métrica del terreno y por otro, la obtención de una buena imagen visual del relieve. Los fines perseguidos por el sombreado de pendiente y el sombreado oblicuo son idénticos a los perseguidos por las normales de pendiente y de sombra.

#### 2.1.1. Sombreado de pendiente

Se basa en considerar una iluminación cenital sobre el terreno, de forma que las superficies horizontales reciban un máximo de luz, y las verticales estén en sombra. Las pendientes iguales recibirán la misma cantidad de luz, tanto menor cuanto más inclinadas estén. Por lo tanto, la cantidad de luz recibida será independiente de la orientación de la ladera, como continuación que son del método de las normales de pendiente.

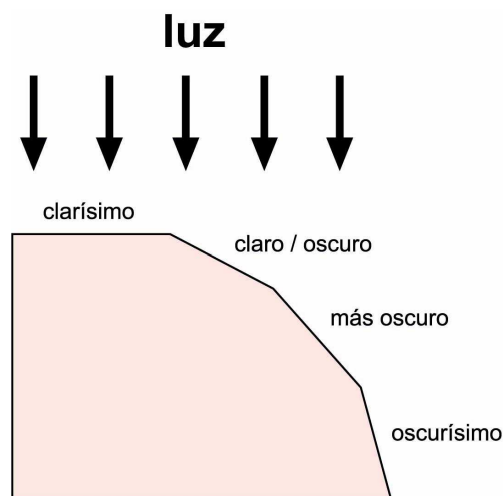


Ilustración 2.1.2: En el sombreado de pendiente se considera una luz cenital para su elaboración

El intento de cuantificar mediante sombras las elevaciones del terreno no es superado satisfactoriamente, ya que además de no cuantificar convenientemente (son mejores las curvas de nivel) no proporciona una buena imagen visual del terreno cartografiado. Por ello, es un sistema en desuso.

El método consiste en, gráficamente, predefinir una serie de grises, normalmente se limitan a cuatro o cinco grises distintos, y en adjudicar unas pendientes determinadas a cada nivel de gris elegido. De esta manera, se podría crear un diagrama parecido al diagrama de pendiente de Lehmann, y utilizarlo de guía a la hora de sombrear la hoja del mapa.

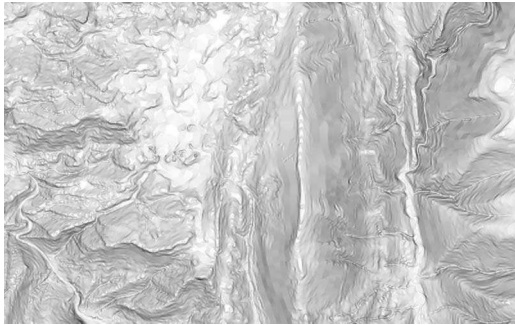


Ilustración 2.1.3: Sombreado de pendientes

No obstante, los resultados mejoran sensiblemente si se utiliza una iluminación oblicua.

### 2.1.2. Sombreado oblicuo

Este tipo de sombreado se basa en las sombras que arrojan las formas del terreno cuando éste es iluminado por una fuente de luz oblicua. Las formas del relieve se diferencian así fácilmente, ya que el lector está acostumbrado a percibir diariamente volúmenes representados de esta manera en dibujos, fotografías, etc. Su aplicación provoca una visión del terreno inmediata y se convierte en el sistema más comprensivo de la representación del relieve.

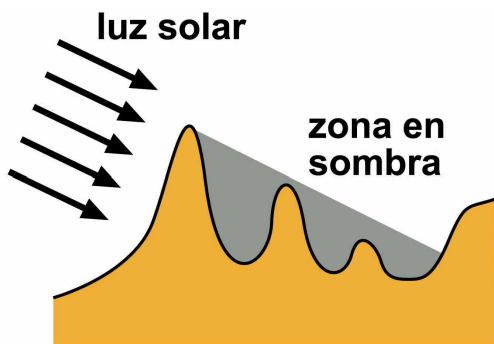


Ilustración 2.1.4: Sombreado oblicuo

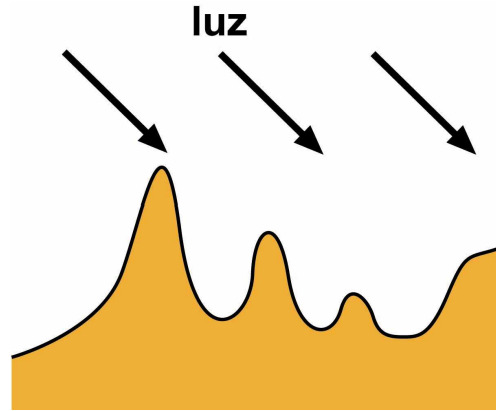


Ilustración 2.1.5: En el sombreado oblicuo se toma una luz difusa proveniente del noroeste, con el fin de no ocultar formas del terreno que iluminadas de una forma más natural quedarían ocultas

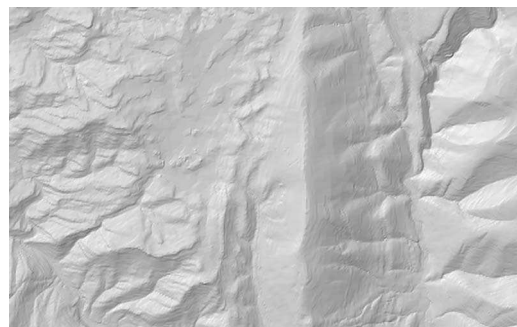


Ilustración 2.1.6: Sombreado oblicuo correspondiente a la misma zona que la Ilustración 2.1.3

Se han realizado diferentes ensayos a lo largo del tiempo para conocer cuál es la posición ideal del punto de luz, y normalmente se acepta que se coloque en el extremo superior izquierdo de la hoja. Es decir, se considera una luz proveniente del noroeste, aunque en las latitudes europeas los rayos solares vengan desde el sur, lo cual podría hacer pensar que ésta debe ser la dirección de la luz en el sombreado, ofreciendo una visión más real del relieve. Sin embargo, en su aplicación ocurre una inversión del relieve. No obstante, ha sido defendida una iluminación desde el sur por reconocidos profesionales del mundo de la cartografía y han sido sombreados mapas de alta calidad según este principio, como algunos del Atlas de Suiza para estudiantes de secundaria, realizado por el profesor Imhof que fue defensor de esta idea.



Ilustración 2.1.7: Sombreado original

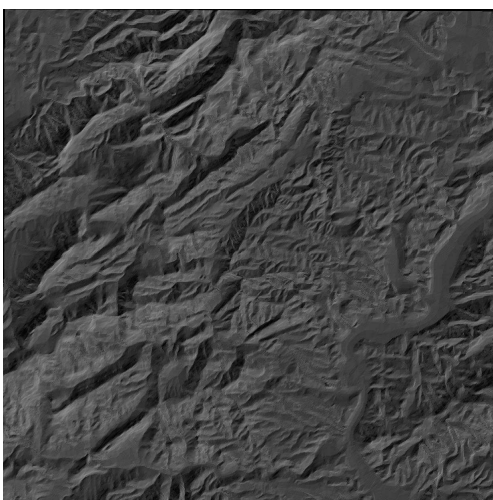


Ilustración 2.1.8: Se han invertido los tonos, obteniéndose un pseudorelieve

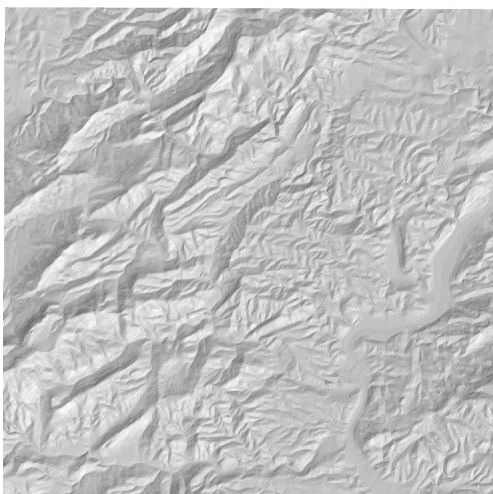


Ilustración 2.1.9: Es la misma zona que la original pero volteada. También en este caso aparecen como divisorias lo que en la primera aparecían como lechos de barrancos

Sin embargo, normalmente se admite una luz desde el noroeste con un ángulo de inclinación de unos  $45^\circ$ . De esta manera, las superficies perpendiculares a esta dirección, y de frente a la luz serán blancas, y las de espaldas a la luz serán las más oscuras.

No obstante, no se deberá aplicar este principio de forma rígida por dos razones:

- La primera, depende de la configuración del terreno ya que se deberá adaptar la inclinación de la luz a las formas a sombrear. Por ejemplo, para crear un buen efecto tridimensional en una zona llana, será más adecuado un ángulo de unos  $20^\circ$  que los  $45^\circ$  mencionados, que proporcionarían una imagen demasiado clara del terreno en el mapa.
- La segunda razón se refiere a las pequeñas formas del relieve que quedarían tapadas por otras mayores si se mantiene fijo el origen de la luz. Se puede mantener el foco al NW con  $45^\circ$  de inclinación, pero a su vez será conveniente ir moviéndolo en diferentes direcciones e inclinaciones con el objetivo de dar una visión del relieve más global mediante una aportación artística, no realista, del dibujante que sombrea la hoja del mapa.

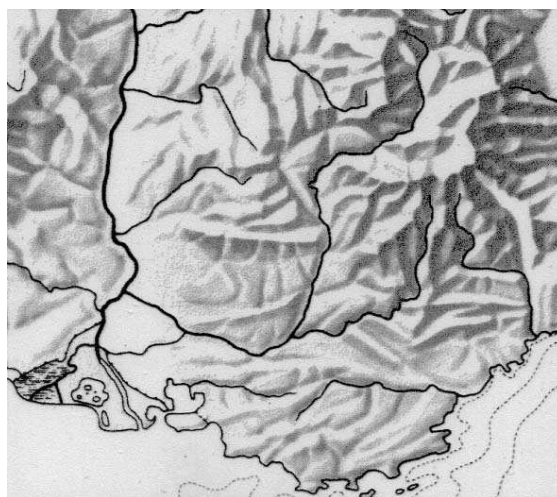


Ilustración 2.1.10

### 2.1.3. Sombreado combinado

Se ha comentado que el sombreado oblicuo es mejor opción que el de pendiente. No obstante, también tiene alguna desventaja, como que visualmente las pendientes de cara a la luz aparecerán como suaves pendientes, en tanto que las que estén de espaldas a ella parecerán pendientes inaccesibles.

Para intentar solucionar las distintas desventajas de ambos sombreados, sin perder las ventajas mencionadas, se realiza el denominado sombreado combinado. Este sombreado consistirá en crear efectos de claroscuros en función de la orientación y del valor de la pendiente. Es decir, es un sombreado de luz cenital variable y función de la orientación.

Para su realización práctica, en realidad, se procede a confeccionar dos sombreados diferentes:

- Un sombreado de pendiente para el que normalmente se eligen colores cálidos.
- Un sombreado oblicuo con colores fríos.

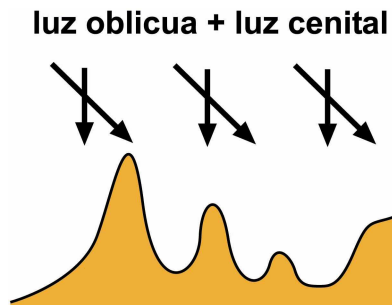


Ilustración 2.1.11: El sombreado combinado consiste en uno de pendiente variable según la orientación de la zona, que se logra aplicando uno de pendiente (normalmente con colores cálidos) sobre un oblicuo (colores fríos)



Ilustración 2.1.12: Sombreado combinado correspondiente a la misma zona que la Ilustración 2.1.3

### 2.1.4. La perspectiva aérea o atmosférica en el sombreado

Para obtener un óptimo efecto tridimensional en la elaboración de un sombreado, se puede aplicar el principio de la perspectiva atmosférica. Este principio se basa en la visión real de los elementos del paisaje: un observador percibe grandes contrastes entre los colores y entre las luces y las sombras de los elementos cercanos. Según se alejan los distintos elementos, se observa que los colores van perdiendo brillo, se igualan, y que los contrastes entre luz-sombra van desapareciendo. Así en el sombreado también se podría evocar las sombras naturales mediante la aplicación de este principio: en las zonas altas (las más cercanas al observador) los contrastes luz-sombra serán muy fuertes y se irán suavizando según descienda la altura del terreno.

### 2.1.5. El color en el sombreado

Se ha señalado anteriormente que el sombreado puede realizarse utilizando colores. Aunque en un principio sólo se utilizaron escalas de grises, hoy se prefiere dar cierta luminosidad al mapa. Los grises no suelen ser neutros, sino que se eligen grises azulados o violáceos (sombreado oblicuo), y tonalidades en rosas y amarillos (sombreado de pendiente).

Tendrá verdadera importancia que los colores elegidos tengan la suficiente transparencia, de forma que aporten la información sin oscurecer otros detalles del mapa, ofreciendo una buena legibilidad del mismo.

### *2.1.6. Métodos manuales de obtención del sombreado*

Los métodos manuales son una manera sencilla de obtener el sombreado de una hoja. Estos métodos se basan en el dibujo de las curvas de nivel que se tendrán como apoyo en la realización del sombreado. Sobre ellas se dibujarán las líneas estructurales del terreno, como vaguadas, divisorias, bordes de los valles, de las terrazas... (para sombrear pequeñas escalas sólo se necesitarían estas líneas). El dibujo se lleva a cabo con lápiz, lavados con acuarela, también aerógrafo e incluso pincel para reforzar las crestas.

Como se puede suponer, la realización de un sombreado a mano, supone la inevitable influencia del dibujante. Es un método subjetivo, en donde el resultado dependerá no sólo de la habilidad en la realización de los clarososcuros en el mapa, sino de la interpretación que éste haya hecho del terreno. Dos personas diferentes no obtendrán una imagen idéntica del mismo terreno. Esto puede parecer un inconveniente pero, sin embargo, si los dos son buenos profesionales ambos pueden obtener imágenes buenas y expresivas del terreno mediante esta técnica.

Como ventaja, se puede añadir, que mediante el dibujo manual se obtienen sombreados de gran expresividad. Como desventaja, la necesaria cualificación del dibujante, que además de saber dibujar ha de saber interpretar la orografía del terreno.

### *2.1.7. Métodos fotográficos de obtención del sombreado*

Se puede obtener una interpretación objetiva de las formas del relieve mediante métodos fotográficos. Estos métodos consisten en confeccionar una maqueta del terreno a sombrear y en fotografiarla convenientemente iluminada.

Esta idea que en principio parece acertada, no ha sido muy satisfactoria debido a los diversos problemas que se plantean en su ejecución. Por un lado, la obtención de una maqueta suficientemente precisa del modelo (a pesar de que se abrieron distintas empresas especializadas en su formación tanto en Europa como en Estados Unidos), y por otro, los problemas al fotografiarla (correcciones de la perspectiva, la correcta iluminación, evitar reflejos...).

### *2.1.8. Métodos analíticos de obtención del sombreado*

Ya en los años setenta surge la idea de obtener sombreados para mapas mediante la utilización de ordenadores. Su realización se basa en el modelo digital del terreno cartografiado. La luz recibida por cada faceta del modelo se obtiene mediante el cálculo de los dos parámetros fundamentales del sombreado: la orientación de la superficie con respecto al punto de luz elegido y la inclinación de la superficie. Se definen los grises a utilizar en la hoja y los valores obtenidos se clasifican en función de éstos.

Métodos más complejos introducen otros parámetros que mejoran los resultados: la variación local de la dirección de la luz (para facilitar el efecto visual en relieve local) y la simulación de la perspectiva atmosférica.

### *2.1.9. Combinaciones del sombreado*

Ya se comentó que el sombreado de la hoja de un mapa facilita la comprensión del relieve por parte del usuario, pero que por otro lado no ofrece una información suficientemente exacta del mismo. Por lo tanto, no es normal ver mapas topográficos y geográficos que únicamente utilicen este sistema de representación del relieve. Lo normal es combinarlo con algún otro sistema que aporte esta información cuantitativa aunque en algunos mapas (por ejemplo, en guías de carreteras) puede ser suficiente la sola utilización del sombreado.

En escalas grandes, como por ejemplo a 1:10.000, no tiene sentido la utilización del sombreado. La cantidad de terreno representable a esta escala en un soporte manejable, normalmente carecerá de entidad suficiente como para utilizar de forma expresiva este sistema de representación.

Ya en escalas del tipo 1:25.000 puede comenzar a utilizarse acertadamente, aunque por ejemplo en España los mapas del IGN se somborean, según la Norma, a partir del 1:50.000, éste incluido. En estas escalas medias, lo normal es combinar el sombreado fundamentalmente con las curvas de nivel. Su combinación resulta satisfactoria para el usuario del mapa, utilizándose además otros recursos como el dibujo de roquedo o las normales para zonas que necesitarán un tratamiento especial.

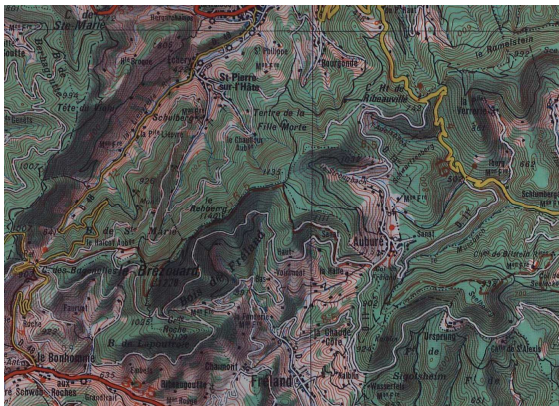


Ilustración 2.1.13: Combinación de sombreado con tintas hipsométricas y curvas de nivel. IGN francés. Escala 1/100.000

A escalas menores, como por ejemplo, 1:500.000 podrían desaparecer las curvas de nivel, y ser sustituidas por tintas hipsométricas como se verá en el próximo apartado. En estos casos, el sombreado, adecuadamente utilizado, también puede aportar esa información cualitativa del relieve.

Para escalas muy pequeñas, a partir 1:30.000.000 es mejor, en principio, no pretender dar una imagen realista del terreno y representar simbólicamente la distribución del relieve mediante tintas hipsométricas. No obstante, todo dependerá del grado de acierto del cartógrafo y dibujante. Si se realiza un cuidadoso estudio de la selección y generalización necesaria, no se descarta que pudiera resultar un buen mapa. Actualmente y mediante la utilización de modelos digitales del terreno, se obtienen muy buenos resultados.



Ilustración 2.1.14: Sombreado combinado con tintas hipsométricas correspondiente a la misma zona que la Ilustración 2.1.3

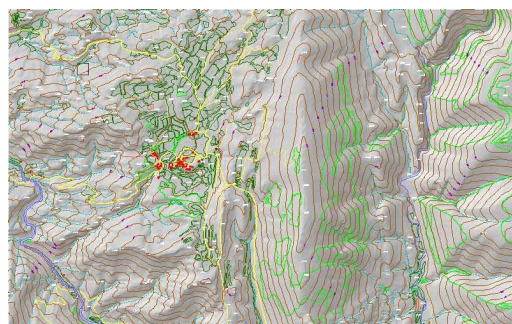


Ilustración 2.1.15: Sombreado combinado con curvas de nivel cada 25 m, correspondiente a la misma zona que la Ilustración 2.1.3

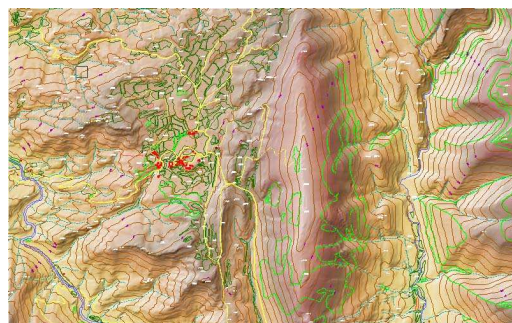


Ilustración 2.1.16: Sombreado combinado con tintas hipsométricas y curvas de nivel cada 25 m, correspondiente a la misma zona que la Ilustración 2.1.3

## 2.2. Tintas hipsométricas

Las curvas de nivel y los puntos acotados proporcionan una información cuantitativa sobre las alturas del terreno. Por ejemplo, el espaciamiento de las curvas de nivel nos informa sobre el grado de pendiente del terreno.

Sin embargo, las curvas de nivel pueden no ofrecer una buena impresión visual a las personas no expertas en lecturas de mapas, por lo que se puede utilizar el sombreado en escalas medias. No obstante, como ya se dijo en el apartado anterior, se puede optar por la representación de una manera simbólica de cómo se vería el relieve en la zona cartográfica.

Las tintas hipsométricas buscan esa representación simbólica mediante la aplicación de distintos colores a zonas de diferentes alturas. El relieve total de un área se subdivide en una serie de zonas en función de su altura, se elige una gama de color, y cada zona se colorea con el color correspondiente. Se utiliza mucho a escalas pequeñas, así como en la mayoría de los atlas, que normalmente utilizan este método de las capas tintadas para informar sobre el relieve en sus mapas geográficos.

Son dos los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo este tipo de representación. Por un lado, la selección de los intervalos de altura en donde habrá que decidir cuántas zonas se van a diferenciar y cuál va a ser el rango de cada una de ellas, y por otro, la elección de la gama de color para su representación.

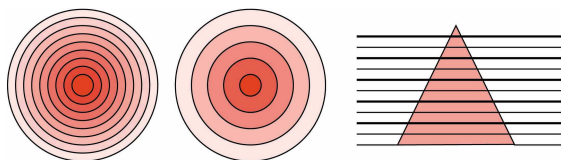


Ilustración 2.2.1: Diferente criterio en la selección de zonas.

### 2.2.1. Selección de las zonas

Como se dijo anteriormente, el cartógrafo deberá decidir tanto el número de zonas como sus límites. En principio se podría afirmar que cuanto mayor sea el número de zonas, más precisa y mejor será la representación del relieve mostrado. Sin embargo, un excesivo número puede mostrar una representación confusa, además de los problemas que puede acarrear la selección de colores en este caso.

Lo normal es limitar la elección a un máximo de entre 7 y 9 zonas para las tierras emergentes y entre 4 y 5 para los fondos de los mares y océanos.

El segundo aspecto mencionado anteriormente, la elección de los límites de cada zona, qué cotas van a separar una zona de otra, debe ser objeto de una discusión más detallada. El estudio posterior se va a limitar, de momento, a la selección de alturas para el relieve emergente.

En un primer paso, se podría dividir en zonas que comprendieran las mismas diferencias en altitud, es decir, clasificar el relieve emergente en intervalos iguales. Así se podrían elegir 9 intervalos de una amplitud de 1000 metros cada uno. En este caso, la primera zona (de 0 a 1000 metros) comprende un total de 115 millones de kilómetros cuadrados de la superficie terrestre, y la segunda (de 1.000 a 2.000 metros) solamente 5 millones. Es decir, casi todo el mapa estaría del primer color, convirtiéndose en un color de fondo y haciendo que el sistema se volviera poco efectivo al aportar poca información.

Por ello, no parece adecuado elegir los intervalos de altura sin tener en consideración la superficie ocupada por cada "escalón". Una manera efectiva de relacionar las altitudes con las superficies ocupadas por dichas altitudes es la llamada "curva hipsométrica de la superficie de la Tierra". Esta curva, dibujada por primera vez por Penk, Wagner y Kossina (1904) representa esta relación: la existente entre las alturas de las tierras emergentes y las superficies que ocupan.

Esta curva muestra que por debajo de los 200 metros se encuentra alrededor del 35% del total de la superficie de la Tierra, y que bajo los 1.000 metros se encuentra el 60% de ese total. Así es fácil entender que un mapa con intervalos iguales de 1000 metros no sea efectivo. Por otro lado, es conocido que la mayoría de las actividades económicas del mundo se sitúan en alturas menores de los 1000 metros, por lo que parece aconsejable que las zonas comprendidas entre 0 y 1000 metros muestren más información altimétrica que las zonas de mayor altitud.

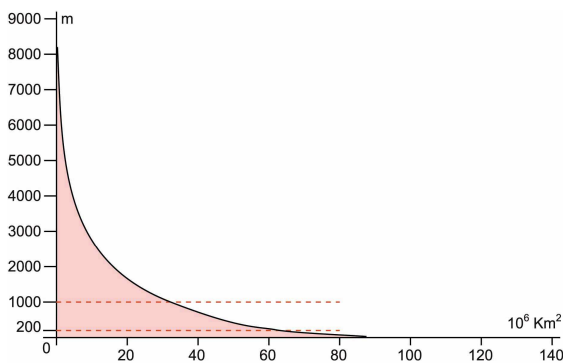


Ilustración 2.2.2

Se podría efectuar el mismo proceso a la inversa, realizando pasos de igual superficie, es decir, dividir el relieve emergente en pasos o escalones de igual superficie y encontrar después los límites de altitudes correspondientes. Esta solución aportaría una buena distribución de colores en el mapa, de esto no cabe ninguna duda, pero es preferible no utilizarla. Desnaturaliza el carácter del terreno al no ser una manera muy significativa de representar los datos.

Un extremo opuesto a éste es el que se realizaba en algunos mapas antiguos, en donde las alturas se seleccionaban de forma irregular intentando evidenciar al máximo las depresiones y las altitudes mayores. Este es un criterio muy acertado, ya que se sintetizan las formas del terreno con un mayor grado de expresividad, no obstante, tiene dos inconvenientes serios.

El primero de ellos es que es válido para un mapa aislado, perdiendo su validez para una serie completa. El segundo es que la lectura de estos intervalos puede verse dificultada debido a su irregularidad. Así, por ejemplo, en la Carta Hipsométrica de Suecia del año 1866 los intervalos de altura, realizados con este criterio, son los siguientes:

Tabla 2.2.1

Límites	Amplitud
0-400	400
400-500	100
500-700	200
700-900	200
900-1200	300
1200-1500	300
1500-2100	600
2100-2500	400

Tras haber evidenciado la necesidad de relacionar altitudes y superficies, y haber expuesto la poca conveniencia de basarse sólo en las superficies o sólo en las altitudes para la representación del relieve, se tienen tres métodos alternativos de selección de alturas.

### 2.2.2. Zonas con incrementos iguales

En el caso de seleccionar un sistema de división de zonas de igual amplitud, la totalidad de las alturas del mapa se subdividen en un número determinado de clases. Por ejemplo:

Tabla 2.2.2

Más de 4.000 metros
3.500 – 4.000
3.000 – 3.500
2.500 – 3.000
2.000 – 2.500
1.500 – 2.000
1.000 – 1.500
500 – 1.500
0 - 500



Tabla 2.2.3

Límites de zona	Escalones	Incremento
4.200 – 5.600	1.400	200
3.000 – 4.200	1.200	200
2.000 – 3.000	1.000	200
1.200 – 2.000	800	200
600 – 1.200	600	200
200 – 600	400	200
0 – 200	200	200

En este ejemplo, se utilizan 9 pasos o escalones de 500 metros de amplitud.

La figura muestra que al dividir la Tierra por zonas de alturas iguales, no se divide ésta en partes iguales de superficie, sino que existen grandísimas desproporciones entre las superficies de distintos intervalos. Por esta desventaja, este método no debe ser aplicado como método general para definir zonas para la utilización de tintas hipsométricas.

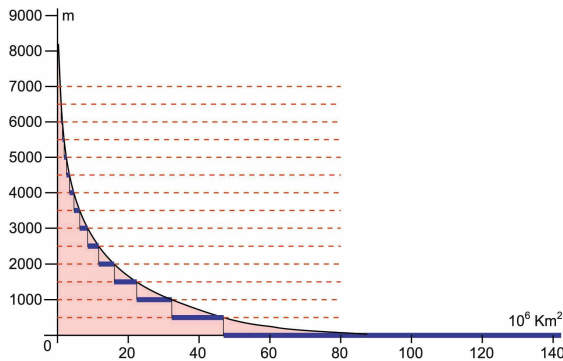


Ilustración 2.2.3

En los únicos casos donde puede aplicarse este método es sobre mapas que representen superficies comprendidas en alturas menores de los 1000 metros, ya que en estas zonas la curva hipsométrica de la Tierra se asemeja a una recta. Entonces el sistema además de adecuarse a la distribución del relieve, facilitaría su lectura en el mapa.

En este ejemplo, el valor del incremento constante es de 200 metros.

La siguiente figura muestra el efecto de una división de las zonas en progresión aritmética. Comparándola con la anterior, se observa una mejora del reparto de tierras en cada zona, pero todavía existen grandes diferencias de superficies, comprendiéndose todavía bajo los 1500 metros en este caso, muchas de ellas.

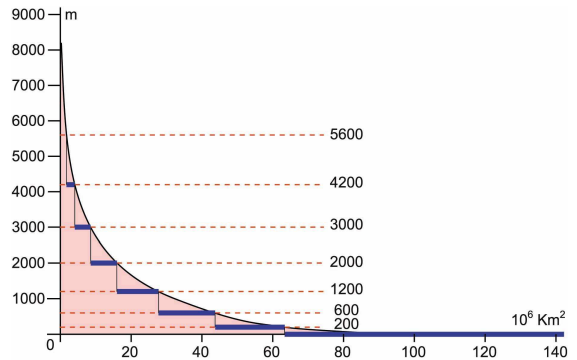


Ilustración 2.2.4

**2.2.3. Progresión aritmética**

Para evitar la desventaja de las desproporciones de las superficies según las altitudes se puede optar por realizar intervalos que aumenten progresivamente, dando así más detalle en las zonas bajas que en las altas.

En el caso de una progresión aritmética, el incremento de la distancia vertical de una zona a la siguiente es un valor constante.

**2.2.4. Progresión geométrica**

Se puede ir aumentando cada intervalo progresivamente mediante la suma de una constante, como en el punto anterior, o se puede también multiplicar por una constante como es el presente caso. En el siguiente ejemplo cada tamaño del peldaño es doble que el inmediato precedente.

Tabla 2.2.4

Límites de zona	Escalones	Incremento
1.500 – 3.150	1.600	800

750 – 1.550	800	400
350 – 750	400	200
150 – 350	200	100
50 – 150	100	50
0 – 50	50	

Tabla 2.2.5

Altura de zonas	Escalones	Incremento
4.000 – 8.000	4.000	2x
2.000 – 4.000	2.000	2x
1.000 – 2.000	1.000	2x
500 – 1.000	500	1.7x
200 – 500	300	3x
100 – 200	100	2x
50 – 100	50	1x
0 – 50	50	

La consecuencia de este sistema sobre el conjunto de las superficies de las tierras emergentes es que al menos por debajo de 1000 metros, la cantidad de superficie por intervalo se equilibra, para este ejemplo.

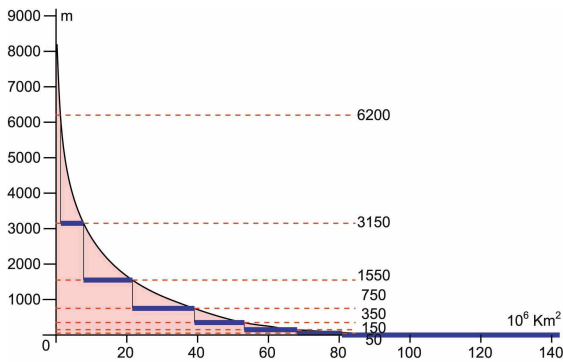


Ilustración 2.2.5

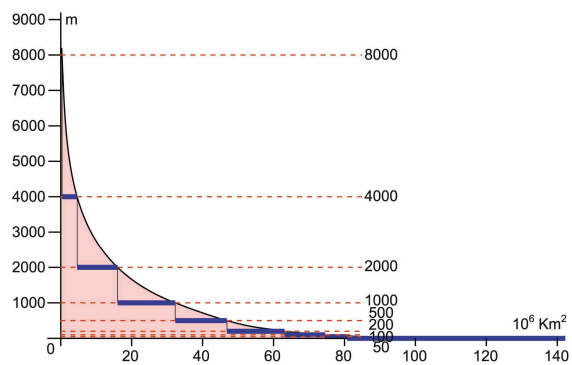


Ilustración 2.2.6

### 2.2.5. Selección de zonas en la práctica

A lo largo de los métodos anteriores se observa la ventaja del incremento geométrico de los intervalos: por un lado, equilibra las superficies, y por otro, da más detalle a las zonas bajas. Se podría manifestar la desventaja, como en el caso de los intervalos irregulares, que los valores límite sean en cierta medida, unos valores raros. Esta objeción es ciertamente válida ya que entorpece la lectura y, por tanto, la comprensión del mapa.

Para superar esta desventaja en la práctica del cartografiado de pequeña escala, la progresión geométrica se aplica con ciertas modificaciones con el fin de obtener valores fácilmente perceptibles, tal y como se hizo en el ejemplo anterior. Otra solución podría ser la que se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 2.2.6

Altura de zonas	Escalones	Incremento
3.000 – 5.000	2.000	2x
2.000 – 3.000	1.000	1x
1.000 – 2.000	1.000	2x
500 – 1.000	500	1.7x
200 – 500	300	3x
100 – 200	100	2x
0 – 100	50	

2.2.6. La curva hipsométrica del fondo del océano

Tabla 2.2.7

En este caso, ocurre como en la selección de alturas para la superficie terrestre, será necesario relacionar profundidades con superficies para ayudar a elegir los intervalos de forma adecuada. Se puede construir la curva hipsométrica del fondo del océano, que como se ve es sustancialmente diferente a la de la superficie emergente. Por consiguiente, los criterios para seleccionar un sistema adecuado a las zonas submarinas serán diferentes a los utilizados para las tierras emergentes.

Límites de zona	
0 – 50	Incrementos progresivos
50 – 100	
100 – 200	
200 – 500	
500 – 1.000	
1.000 – 2.000	Incrementos iguales
2.000 – 3.000	
3.000 – 4.000	
Etc.	

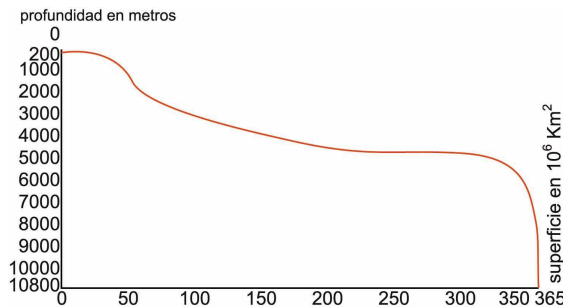


Ilustración 2.2.7: Curva hipsométrica del fondo de los océanos

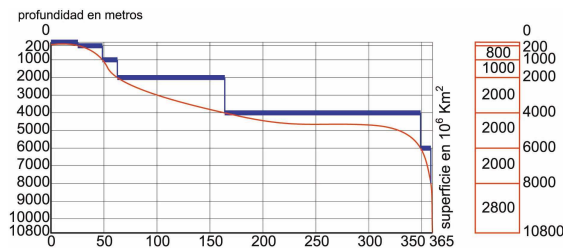


Ilustración 2.2.8: Para la representación general de profundidades mediante tintas hipsométricas, se podría utilizar esta escala de 7 intervalos

La mayor superficie del fondo del mar se encuentra entre los 2000 y los 6000 metros bajo el nivel del mar. El gradiente de la curva en estas profundidades es relativamente lineal y el sistema de zonas de igual altura puede ser adecuado. Sin embargo, entre las profundidades de 0 a 2000 metros, el gradiente de la curva no es lineal y deberán elegirse los límites de las zonas mediante un incremento progresivo de los intervalos.

En la práctica, a menudo se aplica un método que cumple una progresión "pseudogeométrica" para las zonas de los 0 a los 2000 metros de profundidad, a partir de los cuales se realizan intervalos iguales.

En cualquier caso los límites de los 100 y los 1000 metros deberían ser representados, por ser los que delimitan los bordes de la plataforma continental dando paso a las profundidades abismales de los océanos.

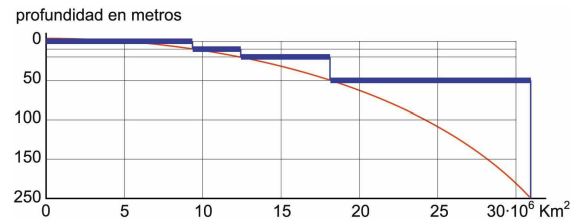


Ilustración 2.2.9

2.2.7. Selección de la gama de color

Una vez elegidos los intervalos de altura para un mapa determinado, se deberá elegir una gama de color para relacionar cada intervalo con un color diferente. En el tiempo se han utilizado diferentes gamas, y aunque algunas de ellas (sobre todo al principio) fueron confeccionadas a capricho del cartógrafo, en la mayoría de ellas se intenta seguir algún criterio determinado. Así, por ejemplo, algunas gamas se realizan pretendiendo facilitar la visión de la imagen tridimensional del relieve, y otras por el contrario lo que buscan es reafirmar el carácter simbólico de este tipo de representación.

Algunas gamas buscan que las transiciones de una capa a otra no sean demasiado bruscas, expresando así la continuidad de la topografía, y otras sin embargo, refuerzan las diferencias de color entre capas, buscando una clara diferenciación entre cada una de ellas. Por otro lado, si las tintas van a combinarse con otros elementos de representación del relieve será obligado elegir tonos más suaves para no recargar el mapa por superposición de información.

**2.2.8. Gamas tradicionales de color**

Tradicionalmente, en mapas geográficos de pequeña escala, la escala de color comenzaba con un verde azulado para las zonas bajas y terminaba en un marrón rojizo para las zonas altas.

Tabla 2.2.8

- Marrón rojizo oscuro
- Marrón medio
- Siena
- Amarillo
- Amarillo verdoso
- Verde amarillento
- Verde azulado

Pueden encontrarse muchos ejemplos de este tipo de escala en los atlas escolares, que ha quedado anticuada. El hecho de aplicar colores oscuros a las zonas altas, hace que el mapa tome una apariencia sombría y que se tengan dificultades para la lectura de los detalles situados sobre las tintas marrones y marrones oscuras. Por ello, este tipo de gama ha sufrido varias modificaciones.

Tabla 2.2.9

- Marrón rojizo
- Marrón
- Marrón claro
- Marrón verdoso
- Verde oliva
- Verde
- Verde azulado

**2.2.9. Modificaciones a la gama de color tradicional**

Otras escalas de color han sido diseñadas basándose en la tradición ya descrita. En todos los casos los colores de las zonas de tierras bajas se mantienen más o menos (verde azulado, verde y amarillo) introduciendo las variaciones en las zonas más altas.

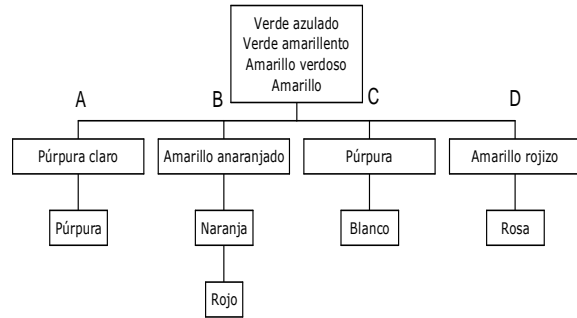


Ilustración 2.2.10

La variante C fue aceptada en 1962 como la estándar para el mapa del mundo a escala 1:1.000.000, que en posteriores ediciones fue levemente modificada, reemplazando el color púrpura por el rosa. Tiene la ventaja de sustituir los colores oscuros de las zonas más altas por otros más claros.

En la escala D todas las tintas son transparentes, lo que representa una ventaja al ser combinables con otras representaciones del relieve. Además esto garantiza una buena visibilidad de otros detalles topográficos.

**2.2.10. Gama basada en el contraste de colores**

Para mapas a pequeña escala, en donde el relieve sólo va a ser representado por tintas hipsométricas (sin combinaciones con otros elementos) pueden utilizarse gamas de alto contraste como la que sigue, mediante las cuales es muy difícil obtener la sensación del relieve. Como ejemplo de este tipo es la siguiente gama:

Tabla 2.2.10

Blanco  
Verde claro  
Verde  
Marrón claro  
Gris

**2.2.11. Gama basada en la variación de altitud**

Se pretende variar la oscuridad de los colores según la altitud, logrando una mayor expresividad plástica en la representación del relieve. Cuando los colores no sean demasiado contrastados, además permitirán combinar este sistema con otros recursos gráficos como el sombreado.

Algunas gamas seguirán el principio “cuanto más alto, más claro” como ejemplo se tiene la siguiente:

Tabla 2.2.11

Blanco  
Amarillo  
Gris verdoso  
Gris

Esta gama ofrece por sí misma una aceptable impresión tridimensional del terreno, y al combinar bien con el sombreado se puede dar una buena representación del relieve. No obstante, tiene una desventaja importante como es el oscurecer las zonas más bajas, que es en donde hay más datos planimétricos que representar.

Otras gamas seguirán al principio “cuanto más alto, más oscuro” intentando evitar la desventaja anterior, como por ejemplo:

Tabla 2.2.12

Marrón oscuro  
Marrón claro  
Blanco

**2.2.12. Gamas para conseguir efecto tridimensional**

Este sistema ideado por el profesor Imhof, consiste en incluir el efecto de la perspectiva atmosférica (cambia el color y los efectos de luz cuando cambia la distancia al observador), mediante la combinación de tintas transparentes con el sombreado. En las montañas más altas el contraste entre las zonas de luz y de sombra es muy fuerte. Este contraste disminuye conforme se va bajando en altitud, hasta igualarse en color en los valles que se representan en gris azulado. Se trata de una representación naturalista, que crea así un óptimo efecto visual del relieve del terreno.

Tabla 2.2.13

Zona iluminada	Zona en sombra
Amarillo pálido	Gris oscuro
Verde amarillento	Azul grisáceo
Verde	Verde azulado
Verde azulado	Gris azulado verdoso
Gris azulado verdoso	

**2.2.13. Gamas para el océano**

Las tintas son de gran ayuda en la comprensión del relieve submarino que es complejo e irregular. Para los fondos marinos normalmente se utiliza un único tono, el azul, que va variando en valor y saturación con las profundidades según el principio “cuanto más profundo, más oscuro”. En este caso, también puede optarse por una continuidad de los colores, o bien pueden exagerarse las zonas costeras mediante azules mucho más claros que los de las grandes profundidades.

**2.2.14. Gamas para escalas medias y pequeñas**

Esta gama se utiliza mucho en Suiza que, en sus zonas montañosas, la extiende, combinada con sombreado, desde la escala 500.000 hasta la 10.000.

Tabla 2.2.14

Rosa claro – Blanco  
 Amarillo rojizo  
 Amarillo verdoso  
 Verde amarillento  
 Verde  
 Verde azulado  
 Gris azulado verdoso

Es muy parecida a la variación D de la gama tradicional, aunque con colores más intensos y un efecto naturalista en la utilización del rosa en las zonas altas. Como admite muy bien la combinación con otros sistemas de representación del relieve se puede combinar con cualquiera de ellos, sombreado, roquedo, curvas; puede incluso utilizarse con los tres sistemas simultáneamente con la única condición de utilizar colores más suaves.

#### 2.2.15. Ajuste de la gama al número de intervalos

Una vez decididos los intervalos y la gama de color a utilizar para un mapa determinado, se deberá utilizar un último paso consistente en adecuar la gama elegida al número de intervalos a representar, ya que a menudo no coincidirán en número. La gama elegida habrá que ampliarla o reducirla según cada caso (zona cartografiada, escala, propósito del mapa...) y decidir qué color va a corresponder a cada intervalo.

#### 2.2.16. Utilización de las curvas con las tintas hipsométricas

Muchas veces los distintos colores de las tintas se separan mediante curvas, y otras muchas, sin embargo, no. La utilización de curvas enfatiza gráficamente y con precisión cuáles son los límites de las tintas, permitiendo una mejor diferenciación de colores parecidos, y reforzando su distribución secuencial. Se puede decir, por tanto, que su aplicación facilita la lectura y la comprensión del mapa, aunque por otro lado, también pueden resultar confusas en algunos casos. Normalmente, dependerá de los elementos que se combinen en el mapa para la representación del relieve.

De forma general, se puede decir que su uso es aconsejable cuando el relieve sólo se representa por tintas. No obstante, si las tintas se van a combinar con un sombreado muy detallado en mapas de escala pequeña por ejemplo, puede ser conveniente no introducirlas (podrían empastar el mapa final). Por lo tanto, ésta será una decisión a tomar a la hora de confeccionar un mapa, sin que se pueda ofrecer una serie de recetas que sean válidas para todos los casos.

En el caso de utilizar curvas, éstas deberán dibujarse muy finas y con un color que no sea demasiado oscuro. Una buena opción es el color gris, que resulta más adecuado que el negro o el siena, ya que armoniza con todos los colores.

Es aconsejable aplicarlas siempre en la representación del relieve submarino mediante tintas, y de hecho ésta es una práctica común, utilizando para ello un color azul oscuro.

### 3. Modelos digitales del terreno

#### 3.1. Introducción

##### 3.1.1. Visión histórica

Los modelos digitales del terreno nacieron en la década de los 50 como solución a una creciente necesidad de tratamiento digital de problemas tecnológicos relacionados con el conocimiento de la estructura del terreno.

Se planteaba el problema de generar una serie de algoritmos que automatizara trabajos de ingeniería (como cálculo de pendientes, perfiles, áreas o volúmenes) que precisaban de datos del terreno, adquiridos principalmente por restitución fotogramétrica, cuya cantidad de información era masiva y crítica, dada la escasa capacidad de almacenamiento de los ordenadores de la época.

Existen, en la actualidad, una gran variedad de programas informáticos que permiten un tratamiento digital de la cartografía, basándose en filosofías y planteamientos algorítmicos diferentes, dando solución al mismo problema: la representación numérica del relieve.

##### 3.1.2. Conceptos generales

En general, un modelo es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades, teniendo como objetivo primordial su estudio de manera simple y comprensible. Es decir, el objeto original es representado por otro objeto de menor complejidad con el que se podrán conocer o predecir propiedades del primero.

Dado que el modelo representa la realidad con una cantidad menor de información (manera simplificada), existe un error inherente al proceso de modelización que puede ser reducido pero no eliminado.

La reducción del error puede hacerse por dos caminos complementarios:

- Mejorando la precisión y selección, sin aumentar para ello la complejidad del modelo: Implica una experiencia o conocimiento de la estructura del terreno.
- Aumentando la cantidad, aumentando con ello la complejidad del modelo.

La eliminación del error implicaría la identificación del modelo con el objeto real; en este sentido, debe buscarse un equilibrio (función de la escala o precisión final requerida) entre la complejidad del modelo y el error aceptable en los resultados.

Por otro lado, debe existir una relación biunívoca entre el modelo y la realidad, que permita extrapolar actuaciones y resultados producidos en el modelo sobre la realidad, como por ejemplo, el cálculo de una estructura viaria sobre un modelo digital del terreno.

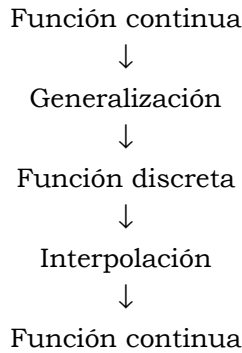
##### 3.1.3. Definiciones

Un modelo digital constituye una representación numérica de la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua:

$$Z=f(x,y)$$

Un modelo digital del terreno es, por tanto, una representación numérica de las características topográficas de éste, expresadas mediante las coordenadas XYZ de los puntos que la definen.

En la práctica, la función no es continua, sino que se resuelve a intervalos discretos, por lo que el modelo digital está compuesto por un conjunto finito y explícito de elementos. Esta generalización implica una pérdida de información que incrementa el error del modelo, y en consecuencia, se propaga a los modelos derivados.



Además de ser una representación numérica y simplificada de la realidad, debe proporcionar las herramientas necesarias para su explotación, es decir, debe permitir la existencia de algoritmos de interpolación. Estos algoritmos serán utilizados en la generación de curvas de nivel, cálculo de volúmenes...

Los principales elementos con los que cuenta un MDT son:

- Adquisición de datos y almacenamiento: Consiste en hacer un muestreo del terreno de manera que con el menor número de datos, queden bien reflejadas las características del mismo.
- Procesado de datos: En el cual se genera la estructura del mismo y se procede a su refinamiento.
- Interpretación del MDT: En la cual se analiza la información que ofrece el MDT.
- Visualización del MDT: Es el análisis gráfico de la información del MDT.
- Aplicación del MDT: Son las funciones específicas para manipular el MDT en cada disciplina.

El primer cálculo de un MDT es la interpolación de las alturas de cada conjunto de puntos, de los cuales se conoce su localización. Hay un gran número de diferentes métodos de interpolación y características operacionales dentro de la variedad de sistemas de MDT existentes.

La calidad y confianza de un MDT depende en gran medida de la precisión, número y distribución de los datos muestreados.

### 3.2. Características de los modelos digitales

La estructura y codificación del modelo digital debe permitir el conocimiento de la estructura geométrica del terreno original que representa, además de las relaciones espaciales entre los datos.

Los mapas topográficos sirven como base cartográfica de otros mapas derivados o temáticos. Siguiendo esta analogía, se podrían construir modelos digitales derivados partiendo de modelos digitales del terreno y datos numéricos adicionales de procesos físicos.

Además, se pueden generar diferentes mapas cuyo objetivo es el mismo, la representación del relieve, pero resultan más gráficos o comprensibles al lector: mapas de curvas de nivel, mapas de relieve basados en tintas hipsométricas, mapas de pendiente, mapas de sombreados...

Por ello, no se puede decir que los modelos digitales sean sustitutos de otros sistemas de representación del relieve, pero sí son una excelente herramienta, por la posibilidad de obtener mapas basados en dichos sistemas de una manera objetiva, matemática y automática.

#### 3.2.1. Ventajas

La ventaja principal es la posibilidad de hacer operaciones sobre una representación numérica y fiable del terreno, pudiendo extrapolar los resultados de éstas sobre el terreno original.

Además, permiten estimar eventos acaecidos o no sobre el terreno, gracias a la incorporación de datos adicionales.

Una aplicación de estimación de sucesos muy extendida, es la simulación de procesos relacionados con la hidrología: zonas de evacuación de aguas, riadas, canalizaciones, etc. Debido a que la representación del terreno es numérica, además, es posible darle características, como, por ejemplo, el tipo de terreno que además determinará su coeficiente de escorrentía, pudiendo, de esta forma, hacer cálculos más exhaustivos.





Ilustración 3.2.1: Ejemplo de simulación: Erupciones de lava de un volcán.

### 3.2.2. Desventajas

Las desventajas de los modelos digitales del terreno se basan, principalmente, en la complejidad de su manejo y elaboración, que requiere un aprendizaje previo para su explotación de manera correcta, así como de equipos informáticos capaces de manejar la gran cantidad de información.

Estas dos desventajas tienen implícita otra desventaja más, que es la inversión económica.

## 3.3. Estructuras de datos

La unidad básica de información en un modelo digital es el punto, definido con la terna de coordenadas XYZ.

La distribución de estos puntos sigue dos modelos principales atendiendo a la estructuración de los datos:

- Modelos de triángulos irregulares (TIN): Estos modelos se basan en la formación de una red de triángulos irregulares (TIN) a partir de los datos originales obtenidos del terreno.

- Modelos de rejillas regulares (DEM): Estos modelos se basan en la formación de una rejilla, formada por la repetición de formas geométricas (rectángulos, cuadrados, triángulos o hexágonos) de las cuáles se conoce la cota de sus nodos.

### 3.3.1. Modelos de triángulos irregulares (TIN)

Este modelo se basa en la generación de una red formada por triángulos irregulares cuyos vértices son los puntos originales obtenidos para la definición del terreno.

Por tanto, la solución para generar el modelo digital es encontrar un algoritmo que establezca las relaciones de vecindad entre los diferentes puntos para formar dichos triángulos.

En este caso, la geometría está constituida por triángulos irregulares, con vértices de coordenadas conocidas, que deben definir todos los cambios significativos en la estructura del terreno para su correcta definición. Por ello, la veracidad del modelo digital dependerá directamente de la selección de datos (puntos y líneas) que se realice en el terreno.

La captura de datos de estos modelos suele ser por métodos topográficos, siendo dichos modelos los más adecuados para determinados trabajos de ingeniería, dada la precisión y veracidad que se puede conseguir en la definición del relieve.

Las aplicaciones más adecuadas de los TIN están en el diseño de obras lineales (carreteras, ferrocarriles, canales, etc.), casos en los que es factible conseguir una buena definición de la traza a un coste económico competitivo con otros procedimientos.

Históricamente, el origen de este tipo de modelos, estuvo a principios del siglo XX, en el interés del climatólogo Thiessen por relacionar datos procedentes de varias estaciones meteorológicas distribuidas no uniformemente. Definió regiones en el plano basadas en conjuntos de puntos (estaciones meteorológicas) de tal forma que “las regiones estaban encerradas por la línea entre la estación en consideración y las estaciones de alrededor”. Basándonos en este enunciado, el término *polígono de Thiessen* ha sido utilizado en geografía para denotar polígonos definidos por un criterio de proximidad con respecto a un conjunto de puntos. Estos polígonos siempre son convexos.

Estos polígonos de Thiessen son de gran utilidad en trabajos en los cuáles es necesario conocer el área de influencia de un determinado punto. Por ejemplo, en trabajos de planeamiento urbanístico, es posible utilizar estos polígonos para analizar cómo influyen en la estructura urbana determinados puntos, como pueden ser los centros comerciales.

La red formada por todos los polígonos de Thiessen definidos por un conjunto de puntos es llamada diagrama de Thiessen o diagrama de Voronoi. Pero hay otra interpretación del diagrama de Thiessen y es una triangulación basada en un criterio de proximidad. Delaunay fue el primero en darse cuenta de esta doble relación; de esta forma, el término *triangulación de Delaunay* es usado para la doble interpretación de los diagramas próximos.

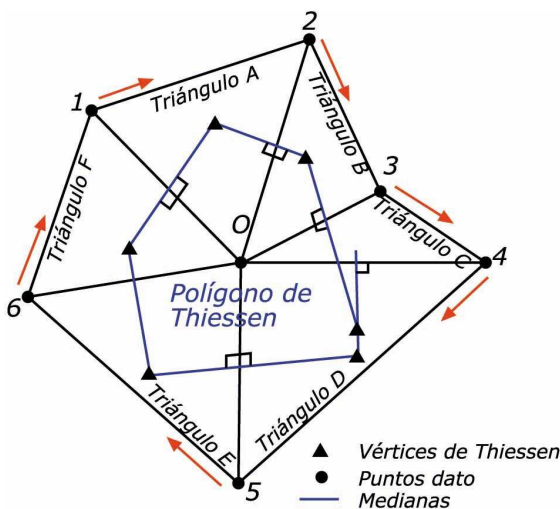


Ilustración 3.3.1: Polígono de Thiessen

Las características más importantes de la triangulación de Delaunay son las siguientes:

- Se generará la misma triangulación independientemente del punto de comienzo del cálculo.
- Los triángulos obtenidos serán lo más equiláteros posibles.
- Dentro de la circunferencia descrita por tres puntos vecinos no se encuentra ningún otro punto.
- La unión de las mediatrices de los triángulos vecinos genera los polígonos de Thiessen.
- Para conservar las líneas de ruptura, éstas deberán formar parte de lados de triángulos.

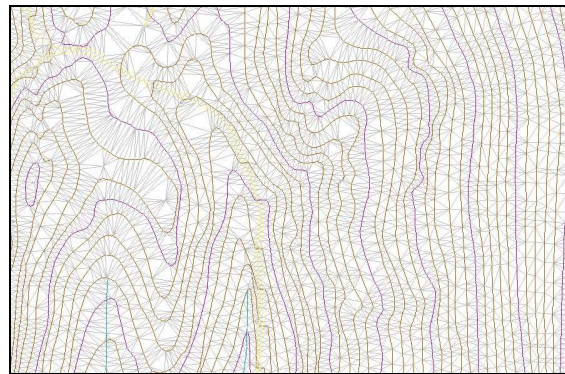


Ilustración 3.3.2: Ejemplo TIN

La forma más trivial de construir un TIN es usar todos los vértices y nodos de las curvas de nivel, así como los puntos singulares como vértices de triángulos.

Este modelo masivo no es el más adecuado por la enorme cantidad de elementos que sería necesario construir y manejar para una zona de cierta extensión y por la redundancia debida a que muchos puntos procedentes de una digitalización rutinaria no aportan una información significativa.

Por ello, se debe hacer una selección previa de los puntos que deberán formar parte del modelo digital mediante una adecuada generalización cartográfica, o utilizar un algoritmo de triangulación que permita una eliminación de puntos no significativos en el proceso de generación de triángulos.

### 3.3.2. Modelos de rejillas regulares (DEM)

Los modelos basados en estructuras regulares se construyen superponiendo una retícula sobre el terreno y extrayendo la altitud media de cada celda. Normalmente, la retícula es una red regular de malla cuadrada, siendo la localización espacial de cada dato determinada de forma implícita por su situación en la matriz. La matriz vendrá simplemente definida por un origen y un valor de intervalo entre filas y columnas.

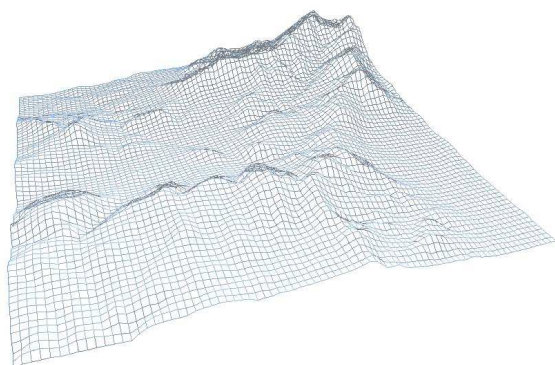


Ilustración 3.3.3: Ejemplo DEM

Al estar los datos estructurados en una malla, la relación topológica entre ellos está en la propia definición de ésta, implicando una falta de flexibilidad en el modelo. Presenta la ventaja de ser una estructura muy simple, pero, en general, la relación coste-precisión no es buena, excepto en terrenos uniformes.

La matriz regular es muy utilizada para construir modelos digitales debido a su cómodo manejo informático y a su simplicidad estructural.

Debido a la necesidad de fidelidad en la representación del terreno, en ciertos terrenos, se podrá variar el intervalo de la rejilla, aunque no todos los programas lo admiten.

En zonas de mayor relieve se necesitará una alta densidad de puntos para obtener una buena precisión resultando, en este caso, un método poco económico.

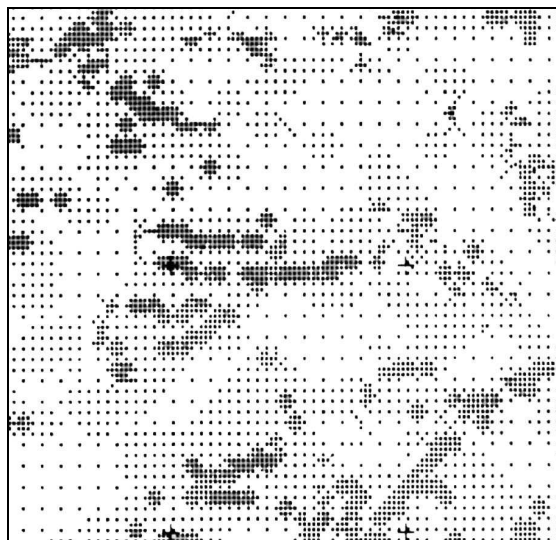


Ilustración 3.3.4: DEM con rejilla variable. Se ha densificado el número de puntos en zonas donde el relieve es más acusado.

No obstante, es muy difícil obtener una correcta definición del relieve mediante estructuras geométricas regulares. El complemento indispensable para obtener un adecuado ajuste es capturar los puntos notables del relieve, así como la adición de aquellas líneas singulares que representan cambios en la pendiente del terreno.

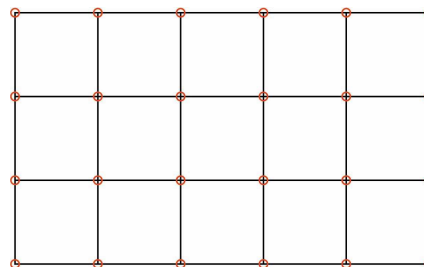


Ilustración 3.3.5: Ejemplo de rejilla regular cuadrada

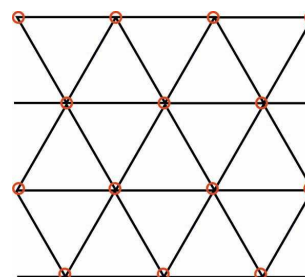


Ilustración 3.3.6: Ejemplo de rejilla regular triangular.

Las principales aplicaciones de este tipo de modelos residen en el área de la Fotogrametría digital, donde se aplican a procesos automáticos de rectificación diferencial para obtener ortofotografías.

### 3.4. Elección de la estructura de datos

La adopción de una estructura de datos concreta supone decidir el método de construcción del modelo e, indirectamente, sobre qué tipo de información va a ser representada y cuál descartada.

Esta selección de información no tendrá grandes influencias sobre terrenos llanos, pero sí sobre terrenos con significativos cambios de pendiente, puesto que, estas últimas estructuras del terreno, no podrán ser representadas con precisión por un modelo basado en estructura regular.

Además, la elección de la estructura de datos vendrá determinada por el software o algoritmos disponibles, puesto que no todos permiten manejar estructuras irregulares por su dificultad de generación y procesamiento.

La elección de la estructura de datos condicionará el futuro manejo de la información.

Entre las dos alternativas, dominan ampliamente las estructuras regulares, probablemente por su simplicidad conceptual y su cómodo tratamiento informático.

### 3.5. Captura de datos

La captura de la información hipsométrica constituye el paso inicial en el proceso de construcción del modelo digital, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos.

Se trata de una fase de gran trascendencia porque la calidad de los datos es el principal factor limitante para los tratamientos que se realicen posteriormente. Tras obtener los datos, éstos deben ser estructurados para formar el modelo digital de alguna de las formas presentadas anteriormente.

La calidad de las fuentes y las técnicas de recogida de datos del terreno, son críticas para obtener un MDT de buena calidad. Por ello, y siempre que sea posible, se adjuntará información adicional acerca de las estructuras que describen la morfología del terreno (estructuras como vaguadas, divisorias, cambios de pendiente, etc.).

Se pueden diferenciar dos métodos de adquisición de datos:

- Métodos directos: Se realizan medidas directas sobre el terreno.
- Métodos indirectos: Se realizan medidas a partir de documentos previamente elaborados.

#### 3.5.1. Métodos directos

Entre los métodos directos, el más extendido es mediante estaciones topográficas, que permiten obtener datos de zonas relativamente pequeñas pero con gran precisión.

Otro método directo de obtención de datos es mediante altímetros transportados por aviones que permiten el registro directo de los datos de altitud en formato digital. Este método es utilizado en el análisis de la topografía de la superficie marina y seguimiento de los hielos polares.

Otro sistema es mediante GPS (*global positioning system*), que utiliza un conjunto de satélites de referencia y, mediante métodos de triangulación, permiten obtener coordenadas de un lugar concreto de la superficie terrestre.

Es un método muy preciso en ciertas condiciones, pero tiene como limitaciones la necesidad de acceder al lugar de medida y tener ciertos apantallamientos debidos a la vegetación de la zona o a edificios que le impiden tener un mínimo de satélites para medir. Estos problemas han convertido al método GPS en un recurso de apoyo, pero no en un sistema básico de captura de datos para construir el modelo digital.

### 3.5.2. Métodos indirectos

Los métodos indirectos son los más utilizados para la adquisición de datos de formación del modelo digital. Sobre todo, para trabajos de gran extensión, el método más utilizado es la restitución fotogramétrica. Además, si se quiere generar un modelo digital a partir de cartografía existente, en formato no digital, el método más extendido es la digitalización.

La restitución fotogramétrica es la forma más rápida de obtener datos altimétricos del terreno, ofreciendo una buena precisión a costes razonables. Además, la fotogrametría actual, permite el almacenamiento digital de los datos obtenidos con un restituidor, pudiendo ser utilizados directamente para la generación del modelo digital.

Por otro lado, con la llegada de la Fotogrametría digital es posible obtener modelos digitales automáticamente a partir de fotografías orientadas y, a partir de estos modelos, obtener ortofotografías rectificadas. Además se pueden utilizar imágenes registradas con sensores montados en satélites.

El otro sistema indirecto de gran expansión entre los usuarios es la digitalización que permite el registro en formato digital de cartografía existente. La digitalización puede ser automática, realizada mediante un escáner, o manual, utilizando un tablero digitalizador.

La digitalización automática genera una imagen de valores de reflectancia. El tamaño de la celda o píxel debe establecerse asegurando que sea capaz de recoger todas las estructuras presentes en el mapa y que la dimensión de los ficheros permita el tratamiento con los medios informáticos disponibles. El proceso de registro puede ser realizado en blanco y negro o color. Posteriormente, es necesario un software de vectorización de la imagen obtenida para generar la estructura vectorial, siendo éste el paso más crítico de la digitalización automática debido a los errores que produce en el reconocimiento, que obliga al usuario a realizar una edición del fichero obtenido. Además, se deberán asignar en este proceso de edición las cotas correspondientes de las entidades altimétricas registradas.

Debido a esta fase costosa de edición, la digitalización automática no es utilizada muy frecuentemente, estando más extendida entre los usuarios la digitalización manual.

La digitalización manual se realiza con un tablero digitalizador sobre el que se coloca el mapa. En dicho tablero, se registran las entidades por medio del seguimiento manual con un cursor.

La procedencia de los datos de digitalización puede ser muy variada, debiendo evitar siempre aquellos que no estén registrados en un soporte estable o en mal estado. Además, es necesario poseer ciertos puntos de coordenadas conocidas, que harán las veces de puntos de control para referenciar los datos digitalizados.

### 3.6. Elementos importantes para un modelo digital

Los elementos necesarios para la construcción de un modelo digital son aquellos que son definitorios para la definición altimétrica de una zona. Así, se podrá incorporar curvas de nivel, puntos acotados y datos auxiliares de diversos tipos.

En general, las entidades pueden ser:

- Curvas de nivel.
- Puntos acotados singulares: cumbres de picos, collados, fondos de depresiones, etc.
- Líneas de ruptura (*breaklines*), que definen la posición de elementos lineales sin valores de altitud explícitos que rompen la continuidad de la superficie.
- Zonas de altitud constante: polígonos que encierran una superficie de altitud única, por ejemplo, lagos.
- Líneas que definen los límites externos del MDT o zonas donde no se desea tener información, por ejemplo, zonas innivadas o anegadas.

### 3.7. Precisión del MDT

Los estándares definidos para la cartografía convencional pueden, en principio, ser válidos para aplicarlos a los modelos digitales. Para ello, se pueden utilizar las tablas de Koppe, propuestas a principio de siglo, que se basan en una relación entre la escala, equidistancia y pendiente de la siguiente forma:

$$\sigma_h = \pm (A+B \cdot \text{tag } \alpha)$$

$$\sigma_p = \pm (B+A \cdot \text{ctag } \alpha)$$

Donde  $\alpha$  es el valor de la pendiente del terreno expresado en grados sexagesimales, A y B son coeficientes que toman los siguientes valores para escalas y equidistancias más usuales.

Tabla 3.7.1

Escala	Eq	$\sigma_h$ (m)	$\sigma_p$ (m)
1000	1	$0.1+0.3 \cdot \text{tag } \alpha$	$0.3+0.1 \cdot \text{ctag } \alpha$
5000	5	$0.4+3 \cdot \text{tag } \alpha$	$3+0.4 \cdot \text{ctag } \alpha$
10000	10	$1+5 \cdot \text{tag } \alpha$	$5+1 \cdot \text{ctag } \alpha$
25000	10	$1+7 \cdot \text{tag } \alpha$	$7+1 \cdot \text{ctag } \alpha$
50000	20	$1.5+10 \cdot \text{tag } \alpha$	$10+1.5 \cdot \text{ctag } \alpha$

La determinación de la precisión de un modelo digital se puede realizar por comparación de una malla de control superpuesta sobre la generada por el modelo digital y obtenida la primera por métodos de Fotogrametría Analítica o mediciones de campo. Tal comparación proporcionará la base para la evaluación de los errores en el canevas de puntos.

### 3.8. Fuentes del error MDT

Los errores de los MDT pueden ser separados en dos categorías:

- Los errores posicionales implican una deficiente localización geográfica de la cota o de la trayectoria de la curva de nivel y afectan, por tanto, a la situación en el plano XY.
- Los errores de cota que suponen una asignación imprecisa de la altitud asociada.

Los errores posicionales afectan a los modelos de estructura irregular, que manejan entidades geométricas. Los modelos de estructura regular, basados en localizaciones definidas implícitamente no se ven afectados por errores de posición.

Los errores de cota afectan tanto a unos modelos como a otros. En el primer caso, suele tratarse de errores en el sentido más básico de la palabra, es decir, fallos groseros y locales en la asignación de la altitud. En el caso de las matrices regulares, el origen del error suele estar en las múltiples operaciones geométricas implicadas en la construcción del modelo digital. En este caso, el error es de naturaleza estadística y global, pudiendo considerarse un atributo que define y caracteriza el modelo digital.

### 3.9. Aplicaciones de los MDT

Debido a los recientes avances tecnológicos, los sistemas de modelado del terreno han aumentado en complejidad, convirtiéndose en unos sistemas que ofrecen soluciones muy poderosas en las distintas aplicaciones. Últimamente, se están creando modelados más específicos basados en la funcionalidad de cada utilidad.

Existe un gran número de aplicaciones en las cuales son necesarios los MDT. Estas aplicaciones se pueden agrupar en los cinco dominios siguientes:

- *Cartografía*: Los MDT tienen un campo bien definido, es decir, su objetivo principal es la generación de gran calidad para ediciones cartográficas, en los que se enfatiza la fidelidad y se evalúa su precisión. Las funciones que se incluyen en este campo son:
  - Captura de los datos (topográficos o fotogramétricos).
  - Valoración de la calidad de los datos.
  - Edición de los datos.

- Producción de ortofotografías y mapas topográficos, entre los que se pueden citar los mapas de representación del relieve.
- *Ingeniería Civil*: Los MDT son utilizados en ingeniería civil para diversas aplicaciones, tales como el diseño de obras lineales, minas, embalses, etc. Estos deben de disponer de rutinas, tales como optimización de trayectos, diagrama de masas y otras muchas más utilidades de diseño.
- *Planificación y manejo de los recursos naturales*: Los campos de aplicaciones centrados en este apartado son medio ambiente, urbanismo, teledetección, ciencias del suelo, agricultura, montes, meteorología, paisajismo, etc. También para producir ficheros digitales que contengan datos sobre cobertura vegetal, hidrología, valor de las tierras, clima, etc., con los que se podrían planificar los cultivos de las distintas regiones.
- *Ciencias de la Tierra*: Las aplicaciones en las ciencias de la Tierra, geología, geomorfología, hidrología y glaciares, son tratadas como un grupo, aunque comparten muchas funciones con el manejo de recursos naturales, que requieren funciones específicas para modelar e interpretar las discontinuidades del terreno, redes hidrológicas, etc.
- *Aplicaciones militares*: Las aplicaciones militares combinan aspectos del resto de dominios de aplicación. Las agencias militares generan gran cantidad de MDT para aplicaciones similares a la ingeniería civil, valorando áreas remotas para el análisis de campos de batalla, involucrando tareas tales como análisis de intervisibilidad, acceso de vehículos y situación de torres de observación y de transmisión.