

Geodesia y cartografía

Fundamentos de los sistemas
de información geográfica

Anna Muñoz Bolas

P07/89036/02928



Universitat Oberta
de Catalunya

www.uoc.edu

Índice

Introducción	5
Objetivos	6
1. Geodesia	7
1.1. Definición de <i>geodesia</i>	8
1.2. Sistemas de coordenadas	9
1.2.1. Coordenadas geográficas	10
1.2.2. Coordenadas cartesianas	12
1.2.3. Coordenadas proyectadas	13
1.3. Proyecciones cartográficas	14
1.3.1. Definición y principios básicos de la proyección cartográfica	15
1.3.2. Tipos de proyecciones	16
1.3.3. Parámetros de una proyección	26
1.3.4. Elegir la proyección adecuada	27
1.3.5. Estudio especial para el sistema de coordenadas UTM	29
1.4. Concepto de georreferenciación	35
1.5. Superficies de referencia terrestres	35
1.5.1. El geoide	36
1.5.2. El elipsoide	38
1.5.3. Alturas ortométricas y elipsoidales	40
1.6. Datum geodésico	43
1.7. Redes geodésicas	46
1.8. Cálculo de transformaciones entre sistemas de referencia	54
1.8.1. Transformaciones de datum	54
1.8.2. Calculadoras geodésicas	62
1.8.3. Ejemplo de cambio de datum	65
2. Cartografía	69
2.1. El origen de los datos: la cartografía	69
2.1.1. Definición de mapa	69
2.1.2. Definición de cartografía y aproximación histórica	70
2.2. Tipos de mapas	75
2.2.1. Cartografía básica	75
2.2.2. Cartografía temática	77
2.2.3. Cartografía derivada	78
2.3. La escala de un mapa	79
2.3.1. Definición	79
2.3.2. Escala grande frente a escala pequeña	81
2.3.3. Representación de la escala gráfica y numérica	82
2.3.4. Selección de la escala	83

2.3.5. Aspectos relacionados con la escala: detalle, precisión y resolución	84
2.4. Diseño Cartográfico	85
2.4.1. Definición del objetivo y funcionalidad del mapa	86
2.4.2. Selección del método de elaboración	88
2.5. La tercera dimensión: la altitud	90
2.5.1. Representación altimétrica: curvas de nivel, sombreado del terreno y cotas	91
2.5.2. Medición de alturas sobre un mapa: interpolación de curvas de nivel	95
2.5.3. Cálculo de la pendiente de un terreno	96
2.5.4. Perfil topográfico	98
3. Datos cartográficos	101
3.1. Descripción de los tipos básicos de representación de datos geográficos	101
3.1.1. Estructura de datos vectorial: puntos, líneas y polígonos	102
3.1.2. Estructura de datos raster: píxeles	104
3.1.3. Comparación entre los modelos de datos vectorial y <i>raster</i>	105
3.2. Fuentes de datos cartográficos	105
3.2.1. Fuentes de datos temáticos	106
3.2.2. Fuentes de datos topográficos	107
3.2.3. Fuentes de datos de imágenes de satélite	108
Resumen	111
Actividades	113
Ejercicios de autoevaluación	114
Solucionario	116
Glosario	117
Bibliografía	119

Introducción

Este módulo versa sobre los fundamentos geodésicos y cartográficos necesarios para poder utilizar correctamente la información que se quiera tratar con un sistema de información geográfica (SIG). Dado que la potencia de un SIG se basa en el uso que se hace de estos sistemas, debéis conocer las nociones teóricas subyacentes en cualquiera de sus funcionalidades.

En el primer apartado empezaremos por aportar una visión general de la geodesia y trataremos uno de sus objetivos fundamentales: la georreferenciación. En particular, trataremos desde conceptos tan básicos como los sistemas de coordenadas y los sistemas de referencia, hasta nociones más complejas como las redes geodésicas o bien las transformaciones de datos entre diferentes datums, pasando por el estudio en profundidad de las diferentes proyecciones cartográficas.

A continuación, en el segundo apartado, ofreceremos una visión histórica de la disciplina cartográfica y estudiaremos los diferentes aspectos técnicos implicados en el desarrollo de un proyecto cartográfico. De esta manera podréis analizar qué recursos o qué metodología es más adecuada para alcanzar el objetivo de vuestros proyectos.

Finalmente, en el tercer apartado de este módulo, describiremos los diferentes tipos de datos cartográficos y los compararemos para que podáis saber escoger el más adecuado para vuestras necesidades. Para acabar, mostraremos un listado de diferentes fuentes de datos cartográficos disponibles en Internet.

Objetivos

Una vez finalizado este módulo, el estudiante habrá desarrollado las siguientes capacidades específicas:

1. Entender los mecanismos básicos asociados al proceso de georreferenciación cartográfica, como son los sistemas de coordenadas y los sistemas de referencia o datum.
2. Comprender la importancia de identificar y saber usar las diferentes proyecciones cartográficas en función de sus propiedades.
3. Distinguir las diferentes superficies de referencia terrestres, conocer sus características y saber calcular la altitud con respecto a cada una.
4. Conocer los diferentes algoritmos de transformación entre sistemas de referencia y saber utilizarlos.
5. Tener una visión global e histórica de la disciplina cartográfica.
6. Desarrollar una visión general del proceso cartográfico necesaria para un buen planteamiento de un proyecto SIG.
7. Saber analizar las diferentes decisiones tecnológicas que deben tenerse en cuenta a la hora de emprender un proyecto cartográfico.
8. Localizar diferentes fuentes de datos cartográficos y saber qué datos son los más adecuados para desarrollar un proyecto SIG.
9. Conocer y aprender a utilizar las diferentes herramientas de cálculo geodésico disponibles en línea.
10. Adquirir el vocabulario geodésico y cartográfico elemental.

1. Geodesia


La geodesia es una ciencia básica con fundamentos matemáticos y físicos. Sus aplicaciones se extienden por diferentes ramas de conocimiento, como por ejemplo la topografía, la cartografía, la fotogrametría o la navegación. Está relacionada con la astronomía y la geofísica, de tal manera que unas ciencias se basan en las otras tanto en los métodos como en los objetivos.

El objetivo de la geodesia, como veremos en profundidad en este apartado, es el estudio y determinación de la forma y dimensiones de la Tierra. Dado que este objetivo está íntimamente vinculado al proceso de determinación de posiciones de puntos sobre la superficie terrestre (georreferenciación), serán de especial interés para nosotros las implicaciones prácticas de esta ciencia.

Hay que describir los fundamentos de la georreferenciación de elementos o de fenómenos naturales para poder entender los mecanismos con los que los sistemas de información geográfica (SIG) analizan y manejan la información. Algunos de los conceptos que se van a explicar a lo largo de este primer apartado del módulo de fundamentos y que conforman la introducción a la geodesia necesaria para todo nuevo usuario de SIG, son los siguientes:

- La definición del concepto de *geodesia* y la motivación de su estudio (subapartado 1.1).
- La descripción de los diferentes sistemas de coordenadas geodésicas (subapartado 1.2), así como de las proyecciones cartográficas que transforman puntos situados sobre una esfera, en puntos sobre un plano (subapartado 1.3).
- La definición del concepto de *georreferenciación* (subapartado 1.4).
- La explicación de las superficies de referencia terrestres, como son el geoide o el elipsoide (subapartado 1.5).
- Los conceptos de *datum* (subapartado 1.6) y *redes geodésicas* (subapartado 1.7).
- La definición de *sistema* y *marco de referencia* (subapartado 1.8).

El estudio en profundidad de la geodesia no es nada sencillo. No obstante, podemos alcanzar un conocimiento general de los métodos y de las técnicas de esta ciencia, tal como iremos viendo durante el desarrollo de este apartado.



Ved el modo en que los sistemas de información geográfica analizan y manejan la información, en el módulo "Introducción a los sistemas de información geográfica".

Al final del apartado, en el subapartado 1.9, se mostrarán ejemplos prácticos de cálculo para la transformación de puntos entre diferentes sistemas de referencia que ayudarán a consolidar los fundamentos teóricos planteados.

1.1. Definición de *geodesia*

¿Qué es la geodesia? ¿Quién la necesita y para qué? Según Helmert (1880), podemos definir de manera sencilla la *geodesia* como la ciencia que estudia la figura y las dimensiones de la Tierra. No obstante, si pensamos en las fotografías de nuestro planeta visto desde el espacio, como la que tenéis en la figura 1, la Tierra nos parece redonda. Entonces, ¿qué es lo que realmente estudiamos?

La razón del estudio de la forma de la Tierra es que ésta es redonda, aunque no completamente, y debe estudiarse cómo es realmente para poder hacer mapas precisos. Los mapas tienen un papel esencial en nuestras vidas. Un buen mapa puede ayudarnos a comprender todos los tipos de información de los que disponemos actualmente, y eso en sí mismo ya es un buen objetivo.

Desde los inicios de la humanidad, hace miles de años, se han utilizado diferentes símbolos para indicar localizaciones de los lugares de nuestro entorno. Posteriormente se necesitó representar zonas más extensas, y con simples indicaciones gráficas no era suficiente. Para hacer esta representación se tuvo que confeccionar mapas mejores. Y para hacer mapas mejores, que comprendieran territorios más extensos, se necesita una manera de identificar con una única dirección cualquier elemento sobre la superficie de la Tierra. Por este motivo, es necesario conocer la forma de la Tierra. Es decir, necesitamos la geodesia.

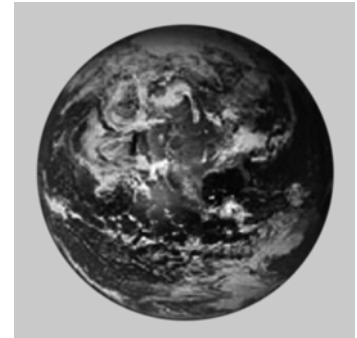
Actualmente, el ámbito de la geodesia es mucho más amplio que la definición clásica de Helmert, dado que incluye el campo gravitatorio y su variación en el tiempo.

El diccionario *Webster* define la geodesia como "la rama de la matemática aplicada que determina por observación y medición la posición exacta de puntos, elementos y áreas de grandes dimensiones sobre la superficie terrestre, las dimensiones y la figura de la Tierra, y las variaciones del campo gravitatorio".

La geodesia es la ciencia que estudia la figura, las dimensiones y el campo gravitatorio de la Tierra, así como su variación en el tiempo.

La geodesia es una ciencia básica que usa los principios de las matemáticas, la astronomía y la física que actualmente se aplica con el uso de las modernas tecnologías. Por otra parte, proporciona, con sus resultados de mediciones y cálculos, la referencia geométrica para el resto de ciencias, como la geología o la geodinámica, que estudian la dinámica del planeta y los factores que influyen en ella.

Figura 1. Imagen de la Tierra desde el satélite TIERRA con el sensor MODIS a 700 km sobre el planeta.



Merrian-Webster's Online Dictionary:
<http://www.m-w.com/dictionary/geodesy>

Geodinámica

La geodinámica es la disciplina que estudia la dinámica de los procesos que han dado lugar a la estructura de la Tierra.

Para saber más, podéis consultar el enlace: http://gsc.ncan.gc.ca/geodyn/index_e.php.

Como objetivos principales de estudio de la geodesia, tenemos:

- **Campo gravitatorio:** determinación del campo de gravedad de la Tierra y su variación en el tiempo.
- **Variaciones temporales de fenómenos geodinámicos:** medición y representación de fenómenos como el movimiento polar, la marea terrestre y las deformaciones de la corteza terrestre.
- **Posicionamiento:** determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre.

Ya hemos dicho que nuestro objetivo principal será la determinación de posiciones sobre la superficie terrestre. Para alcanzar este objetivo, empezaremos con la descripción del contexto matemático básico con el que expresaremos un punto sobre la esfera que es la Tierra, como son los sistemas de coordenadas y las proyecciones cartográficas.

1.2. Sistemas de coordenadas

Acabamos de ver que nuestro objetivo principal será la determinación de la posición de un punto sobre la superficie terrestre. En este subapartado estudiaremos los conceptos matemáticos necesarios para representar un punto sobre una esfera –que en nuestro caso es la Tierra–, como son los sistemas de coordenadas.

Un **sistema de coordenadas** es una creación artificial que permite la definición analítica de la posición de un objeto o un fenómeno. Hay múltiples opciones para definir analíticamente la situación geométrica de un elemento y, por lo tanto, es posible escoger entre diferentes sistemas de coordenadas.

Desde el punto de vista puramente matemático, todos los sistemas de coordenadas son admisibles, y el único motivo para seleccionar uno u otro es la conveniencia o el hecho de que una determinada cuestión aparezca en su forma más simple.

Desde el punto de vista práctico, se escogen los sistemas de coordenadas que permitan representar la cuestión objeto de estudio de una forma física y geoméricamente interpretable y susceptible de ser medida.

Los sistemas de coordenadas más utilizados para representar la superficie de la Tierra son el sistema de coordenadas geográficas, el sistema de coordenadas cartesianas y el sistema de coordenadas proyectadas. A continuación, vamos a hacer una descripción de cada uno de ellos.



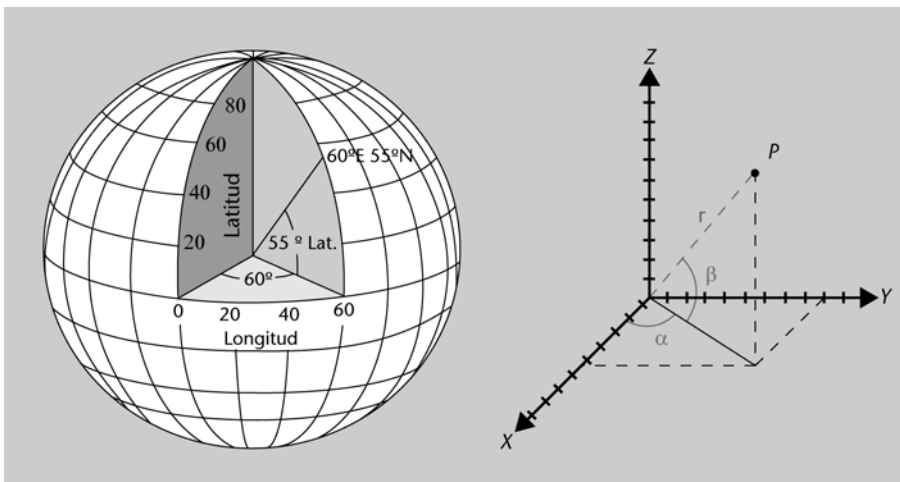
Los sistemas de coordenadas se estudian en el subapartado 1.2 de este módulo y las proyecciones cartográficas en el subapartado 1.3 también de este módulo.

1.2.1. Coordenadas geográficas

Un sistema de coordenadas geográficas o geodésicas utiliza una superficie esférica tridimensional para definir las localizaciones sobre la superficie terrestre.

Fijaos en la figura 2, donde se muestra cómo en este sistema cualquier punto sobre la superficie terrestre se determina con dos ángulos medidos desde el centro de la Tierra, que se llaman **latitud** y **longitud**.

Figura 2. Valores de longitud y latitud de un punto sobre la esfera



Fuente: imagen adaptada de ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.), <http://www.esri.com>

La **longitud** (α) de un punto es el ángulo medido a lo largo del ecuador desde cualquier punto de la Tierra.

Las líneas verticales de igual longitud son círculos máximos que pasan por los polos y se llaman **meridianos**. La longitud se mide con respecto a un meridiano principal, que normalmente es el meridiano de Greenwich (longitud cero), aunque algunos países han utilizado otras líneas de longitud que pasan por Berna, Bogotá o París.

El meridiano de París está a $2^{\circ} 20' 14,025''$ al este del meridiano de Greenwich.

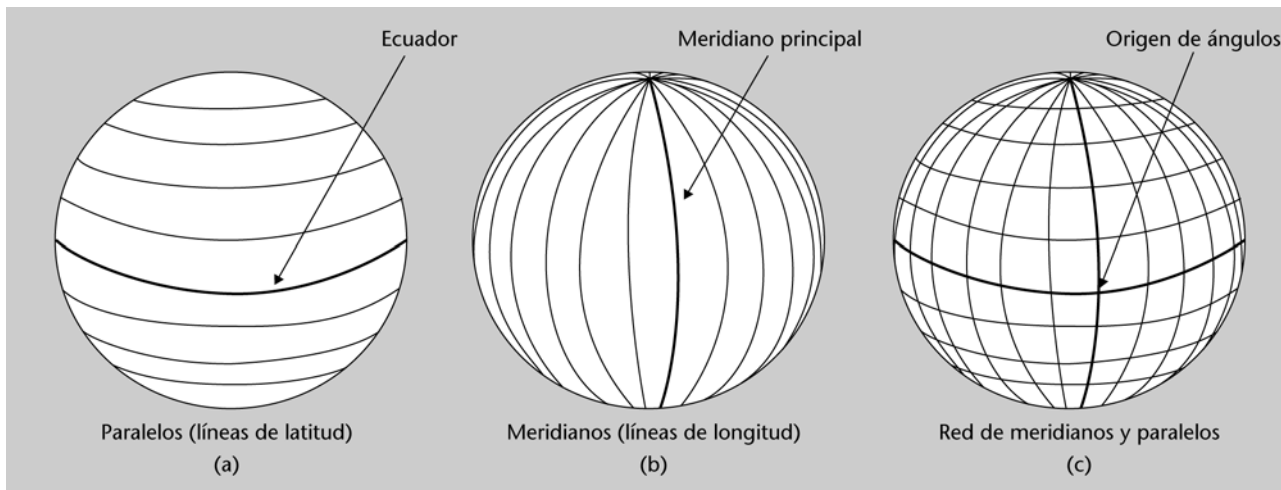
La **latitud** (β) de un punto es el ángulo medido desde el centro de la Tierra hacia el norte, entre el ecuador y la posición de un punto sobre la superficie terrestre. Las líneas horizontales de igual latitud se llaman **paralelos**. Se toma el ecuador terrestre como la línea de latitud cero.

En las figuras 3a y 3b podéis ver un ejemplo de cómo son los paralelos y meridianos. Fijaos en la imagen 3c de la figura para ver cómo estos meridianos y paralelos forman una red sobre la esfera. Esta red tiene el origen (0, 0) en el punto donde se cruzan las líneas de referencia de la latitud y la longitud, es decir, donde se cruzan el ecuador y el meridiano principal.

El ecuador divide la esfera terrestre en dos hemisferios, norte y sur, de manera que la latitud al norte del ecuador será positiva y al sur será negativa. Así pues, los valores de latitud van desde el -90° en el polo Sur hasta los $+90^{\circ}$ en el polo

Norte. El meridiano principal también divide la esfera en dos mitades, este y oeste, de manera que la longitud al este del meridiano principal será positiva y al oeste será negativa con valores en el rango de -180° oeste y $+180^\circ$ este.

Figura 3. Elementos del sistema de coordenadas geográficas: paralelos (a), meridianos (b) y origen de coordenadas (c).



Fuente: imagen adaptada de ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.)

ESRI: <http://www.esri.com>

En definitiva, este sistema de meridianos y paralelos nos permite definir la localización exacta de cualquier punto sobre la Tierra. Cabe decir, sin embargo, que, con este sistema, sólo a lo largo del ecuador la distancia representada por un grado de longitud es equivalente a un grado de latitud. Eso es debido al hecho de que el ecuador es el único paralelo de igual dimensión que un meridiano: es lo que se conoce con el nombre de **geodésicas** (o círculos máximos).

Una **geodésica** es una circunferencia con el mismo radio que la Tierra. En particular, es el círculo que se obtiene como intersección de cualquier plano que contiene el centro de la Tierra con la superficie terrestre. El ecuador y todos los meridianos son geodésicas.

Las geodésicas indican la distancia más corta entre dos puntos de la Tierra. Esta propiedad se utiliza mucho en navegación.

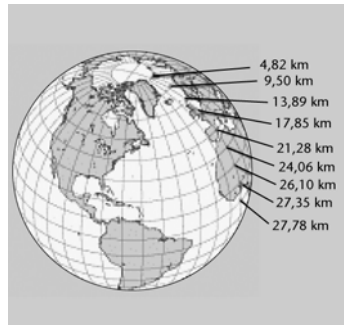
En la figura 4 podéis ver qué distancia representa un grado de longitud a medida que nos aproximamos al polo Norte. Por encima y por debajo del ecuador, los paralelos se van haciendo gradualmente más pequeños hasta llegar a ser un punto en los polos. Dado que los meridianos convergen en los polos, la distancia representada por un grado de longitud decrece hacia cero.

Para calcular la distancia a la que equivale un grado de longitud en una latitud dada, consideramos que el radio de la Tierra es aproximadamente 6.360 km y que un grado de longitud al ecuador es aproximadamente 111 km; entonces:

$$1^\circ \text{ de latitud} = 111 \text{ km}$$

$$1^\circ \text{ de longitud} = \text{coseno}(\text{latitud}) \cdot 111 \text{ km}$$

Figura 4. Distancias este-oeste entre puntos separados por un minuto en diferentes latitudes



Fuente: <http://www.progonos.com/furuti>

1.2.2. Coordenadas cartesianas

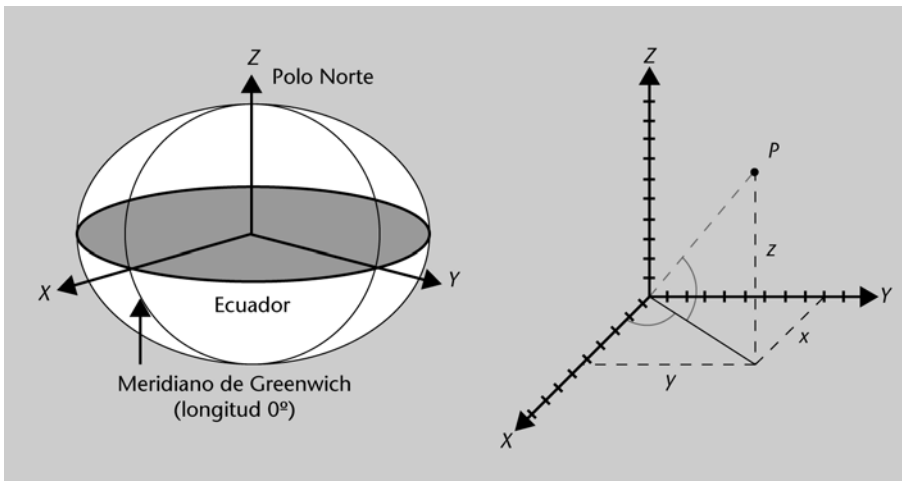
En un sistema de coordenadas cartesianas o geocéntricas, una posición se define en un espacio tridimensional por las coordenadas (x, y, z) . Los ejes de coordenadas, tal como tenéis representados en la figura 5, se definen de la manera siguiente:

- El eje Z pasa por el centro de la Tierra y por los polos.
- El eje X pasa por el centro de la Tierra y por el meridiano principal de Greenwich.
- El eje Y forma un ángulo de 90° con los otros dos ejes.

Elección de los ejes del sistema de coordenadas cartesiano

La elección de los ejes del sistema de coordenadas cartesiano es arbitraria, como se puede deducir del hecho de que el meridiano principal no ha de ser necesariamente el que pasa por Greenwich, como de hecho pasa en algunos países.

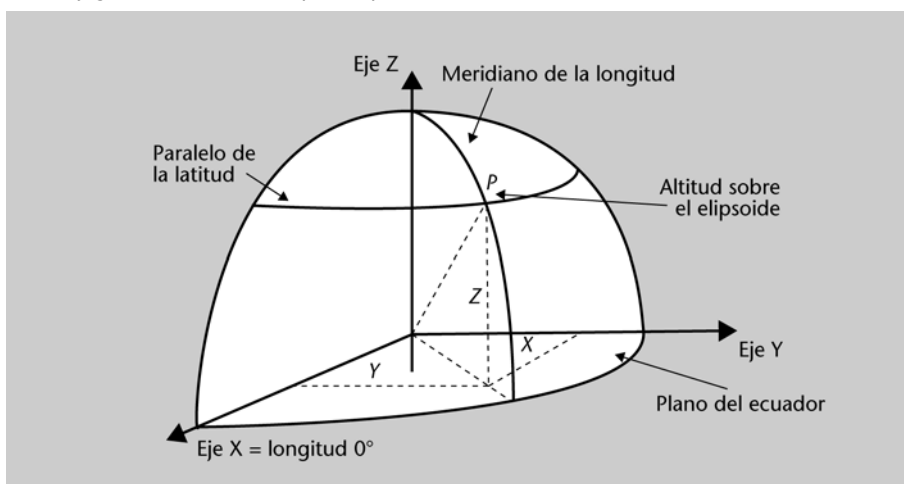
Figura 5. Ejes X, Y, Z del sistema de coordenadas cartesianas



Fuente: imagen adaptada de ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.)

En la figura 6 podéis ver cómo el sistema de coordenadas geográficas y el sistema de coordenadas cartesianas XYZ (coordenadas geocéntricas) se relacionan entre sí si establecemos como origen de X el plano que pasa por la longitud 0° (hacia el este), como origen de Y el plano de longitud 90° , y como origen de Z el plano que pasa por la latitud 0° (ecuador).

Figura 6. Representación de la correspondencia entre coordenadas geográficas (longitud, latitud, altitud) y geocéntricas (X, Y, Z) por un punto P



Fuente: <http://www.creaf.uab.es>

Entonces, un punto P con coordenadas geodésicas:

$$\alpha = -3^{\circ} 35' 57,7336''$$

$$\beta = 39^{\circ} 32' 46,8909''$$

se expresa en coordenadas geocéntricas como:

$$X = 4915809,5121$$

$$Y = -309222,2929$$

$$Z = 4039765,115$$

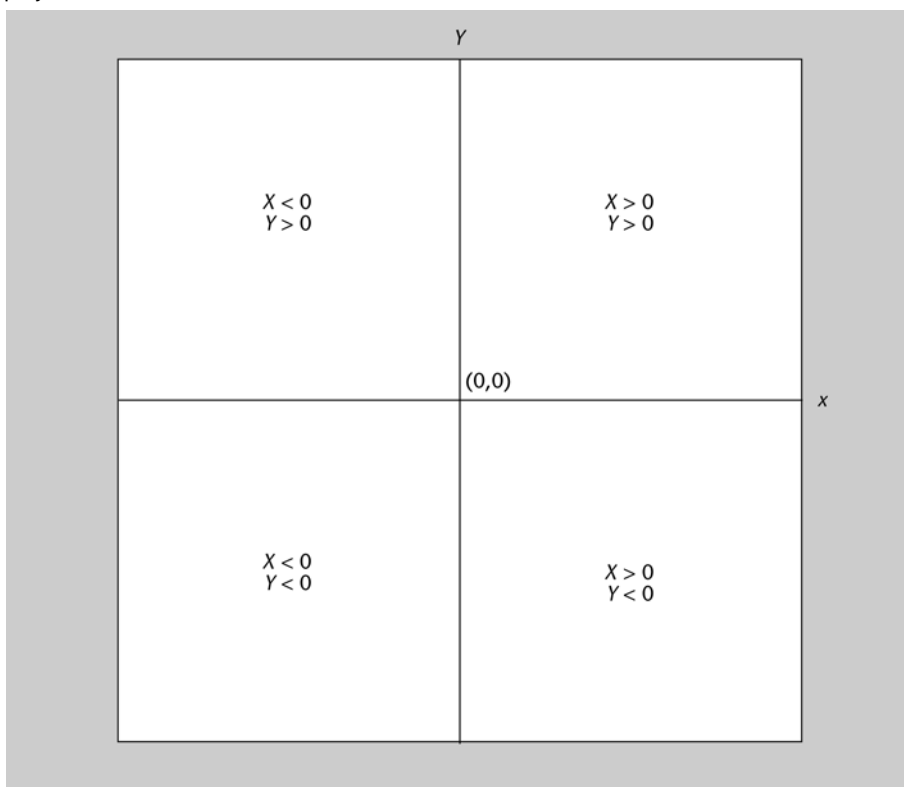
1.2.3. Coordenadas proyectadas

Un sistema de coordenadas proyectadas se define sobre una superficie plana, en la que la localización de las coordenadas se realiza con respecto a una malla (*grid*) donde se ha definido el origen en su centro.

Cada posición tendrá dos valores referidos al punto central. Un valor especificará la posición horizontal y lo llamaremos coordenada X , y otro especificará la posición vertical dentro de la malla y lo llamaremos coordenada Y . Definimos que la coordenada del origen será $(X, Y) = (0, 0)$.

En una malla de líneas verticales y horizontales espaciadas uniformemente, la línea central horizontal es lo que se llama eje X y la línea central vertical es lo que se llama eje Y . Estos dos ejes dividen la malla en cuatro cuadrantes donde los signos de las coordenadas se distribuyen tal como se indica en la figura 7.

Figura 7. Distribución de signos de las coordenadas X , Y en una malla del sistema de coordenadas proyectadas



Fuente: imagen adaptada de ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.)

1.3. Proyecciones cartográficas

En el subapartado anterior acabamos de ver la definición de los principales sistemas de coordenadas para definir la localización de un punto sobre una esfera. En este subapartado vamos a describir el proceso para expresar un punto sobre una superficie esférica proyectado en una superficie plana. Este proceso es lo que se llama *proyección cartográfica*.

En los siguientes subapartados definiremos el concepto de *proyección cartográfica* (subapartado 1.3.1), mostraremos los tipos más comunes (subapartado 1.3.2) y hablaremos de las diferentes distorsiones que, inevitablemente, sufre toda proyección.

Fijaos en la figura 8, donde se muestra la distorsión que sufre una imagen plana al verse representada sobre una esfera. De la misma manera, una superficie esférica se deforma al proyectarla sobre un plano. En este trabajo, Escher presenta una imagen en dos dimensiones como si fuera una imagen tridimensional. Exagera el centro de la imagen, donde está el balcón, que, tal como podéis ver, presenta la máxima distorsión.

Al final del subapartado analizaremos cómo se puede escoger una proyección a fin de que la distorsión sea mínima para el área que se quiere representar y, finalmente, estudiaremos con más profundidad una de las proyecciones de

Figura 8. *Balcón 1945*, Litografía de M. C. Escher



Fuente: <http://mathworld.wolfram.com>

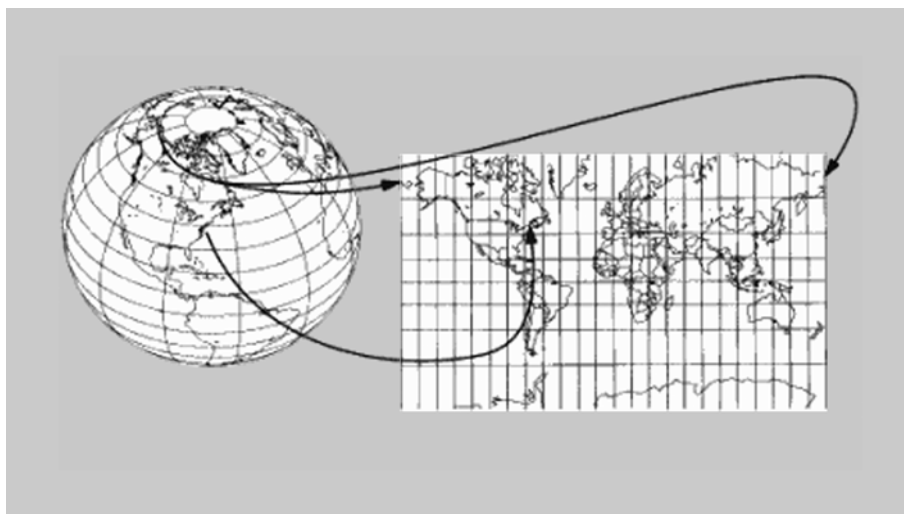
uso más común, como la proyección transversal universal de Mercator (*universal transverse Mercator*, UTM).

1.3.1. Definición y principios básicos de la proyección cartográfica

La Tierra puede representarse como una esfera o, más correctamente, como un esferoide (es decir, como una esfera achatada por los polos). Esta forma esférica puede conservar, sin distorsiones, las relaciones geométricas entre latitud y longitud, ecuador y polos, continentes y océanos y, por lo tanto, puede mostrar direcciones, distancias y áreas sin distorsiones.

Aunque el globo terráqueo presente estas ventajas, es más práctico trabajar sobre una representación plana en un mapa. Así pues, habrá que transformar una superficie tridimensional para crear un mapa en una superficie en dos dimensiones (figura 9). La transformación matemática que permite la transformación de las coordenadas esféricas del globo en un sistema de coordenadas planas es lo que llamamos **proyección cartográfica**.

Figura 9. Las proyecciones cartográficas permiten reproducir la esfera terrestre en una superficie plana.

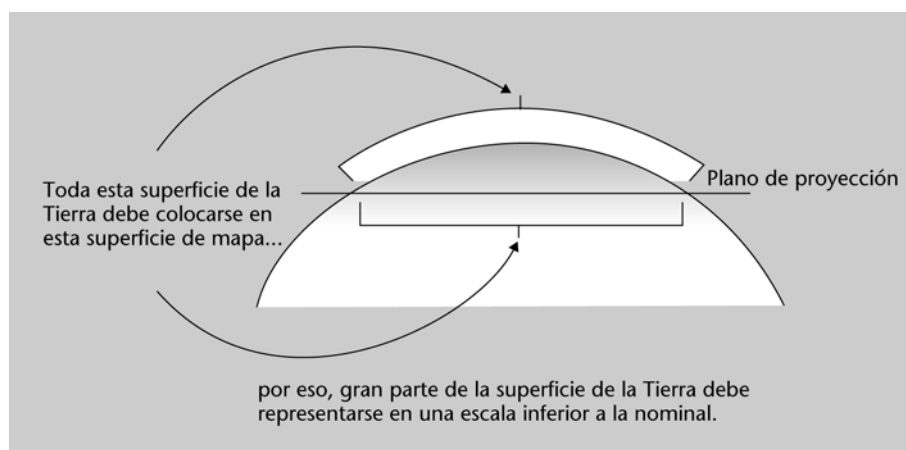


Fuente: <http://www.google.es>

Las proyecciones cartográficas son sistemas que reproducen la esfera terrestre en una superficie plana.

Una proyección cartográfica es una representación sistemática de los paralelos y meridianos de una superficie tridimensional en una bidimensional. Dado que una superficie plana no puede ajustarse a una esfera sin estirarse o encojerse, tal como podéis ver de manera gráfica en la figura 10, es imposible representar los atributos de un globo terráqueo (por ejemplo, meridianos, paralelos, límites entre países, etc.) en un mapa sin producir distorsiones.

Figura 10. Deformación de los atributos de una superficie tridimensional al adaptarse a una bidimensional



Fuente: imagen adaptada de ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.)

1.3.2. Tipos de proyecciones

Las proyecciones estudian las diferentes transformaciones matemáticas destinadas a representar la superficie esférica terrestre en una superficie plana minimizando, en la medida de lo posible, las deformaciones que sufren en este proceso los datos y/o las relaciones geométricas de los objetos representados.

No hay ninguna proyección que no tenga ningún error de deformación, lo cual se llama **distorsión**. Como es imposible conservar todas las propiedades al mismo tiempo, hay que concentrarse en qué tipo de mapa se quiere realizar, ya que cada proyección puede conservar alguna de sus propiedades geométricas: la forma, el área, la distancia o la dirección. A pesar de los problemas relativos a la distorsión, todas las proyecciones mantienen una característica importante: la exactitud del posicionamiento.

A continuación vamos a ver la clasificación de las proyecciones según las propiedades geométricas mencionadas anteriormente, así como la clasificación según la figura geométrica de la que derivan.

Clasificación según las propiedades geométricas

Considerando las propiedades geométricas básicas, podemos clasificar las proyecciones en **conformes**, **equivalentes**, **equidistantes** y **acimutales**. Las proyecciones que no encajan directamente en ninguna de estas clases suelen llamarse **proyecciones de compromiso**.

1) Proyecciones conformes

Las proyecciones conformes se caracterizan por mantener la **forma** de la superficie que se muestra en el mapa.

Esta proyección no distorsiona las relaciones angulares; por lo tanto, las superficies conservan en el mapa la forma que tienen en la superficie terrestre. La condición para que un mapa sea conforme es que meridianos y paralelos se corten en ángulo recto tal como pasa en el globo terráqueo.

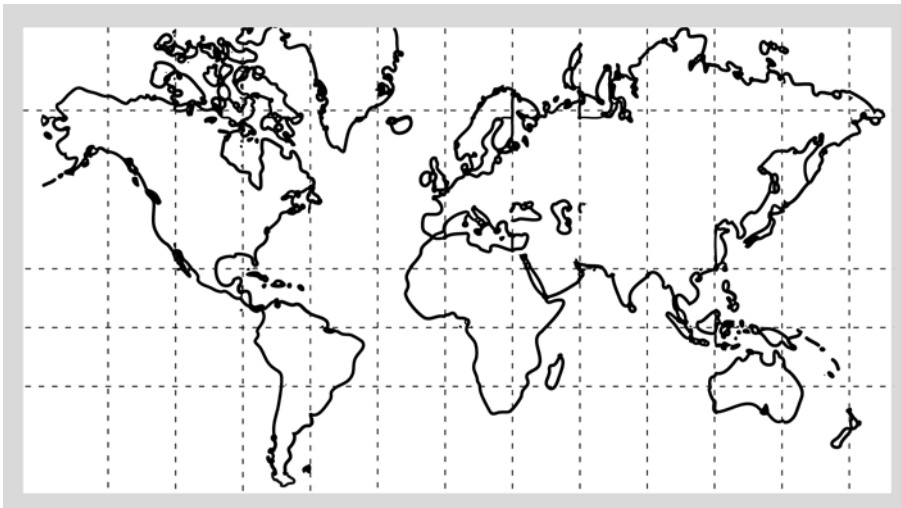
Por otra parte, estas proyecciones distorsionan mucho el tamaño de las superficies cartografiadas y, como consecuencia, la escala no es constante entre regiones del mapa. Por ejemplo, en un mapamundi las superficies en latitudes elevadas se muestran más grandes de lo que realmente son.

Proyección de Mercator

Podéis ver en la figura 11 un ejemplo de proyección conforme (ésta en particular es una que estudiaremos más adelante y que se llama *de Mercator*), donde se muestra la característica básica de que los meridianos y paralelos se cortan en líneas rectas que se cruzan perpendicularmente. En los mapas conformes, la forma de los continentes es real, aunque al acercarnos a los polos la superficie aumenta de forma exagerada.

Concretamente, Groenlandia parece mucho mayor que África, Australia y Sudamérica, aunque la realidad es que África es 14 veces mayor que Groenlandia, Sudamérica es 9 veces más grande y Australia, 3,5 veces más grande.

Figura 11. La proyección de Mercator es conforme



Fuente: ESRI

2) Proyecciones equivalentes o de igual área

Las proyecciones equivalentes o de igual área se caracterizan por que las áreas proyectadas mantienen las mismas proporciones que las áreas de la Tierra que representan. Por lo tanto, 1 cm² representa la misma área en Estados Unidos, Argentina o Siberia.

Proyección de Mollweide

Fijaos en la figura 12, que muestra el tamaño correcto de Groenlandia y África en una proyección equivalente que se llama Mollweide. Comparad el tamaño de Groenlandia tal como se muestra aquí y como se muestra en la proyección de Mercator vista anteriormente.

Para conseguir la equivalencia, hay que deformar los ángulos originales; por lo tanto, una proyección no puede ser al mismo tiempo equivalente y conforme. Las proyecciones equivalentes suelen utilizarse en mapas temáticos que

Figura 12. Representación de Groenlandia y África en la proyección equivalente Mollweide que conserva las áreas



Fuente: <http://www.progonos.com/furuti>

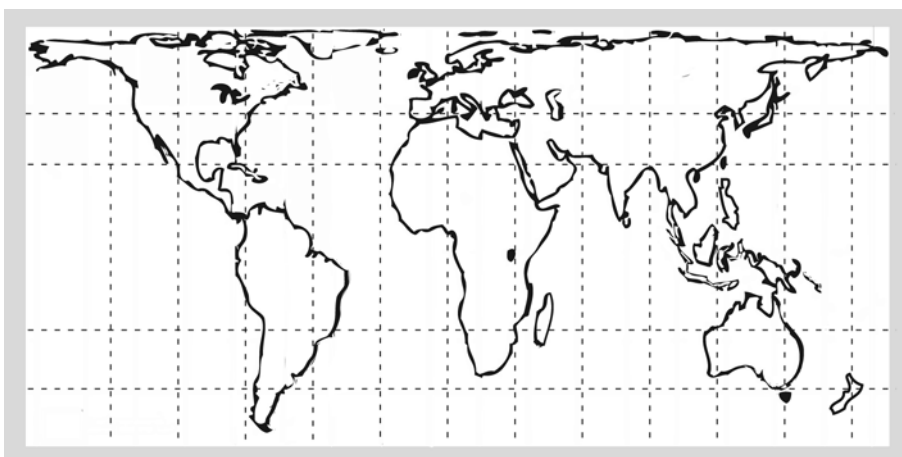
muestran la distribución de variables como la densidad de población, la superficie agrícola, las áreas forestales, etc.

Proyección de Peters

La figura 13 nos muestra un ejemplo de proyección equivalente llamada *proyección de Peters*. Esta proyección proporciona una igualdad de superficies en todo el planeta rompiendo con la visión eurocéntrica de la proyección de Mercator.

La imagen de esta proyección nos sorprende por la forma alargada de los continentes del hemisferio sur, aunque su representación de las dimensiones es la que más se aproxima a la realidad.

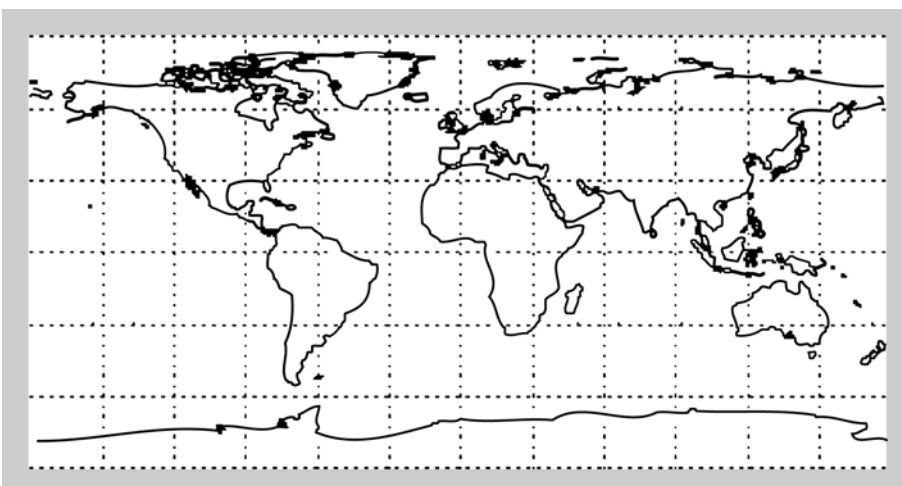
Figura 13. La proyección de Peters es equivalente, conserva el área



Fuente: ESRI

3) Proyecciones equidistantes

Figura 14. La proyección de Miller es equidistante, conserva la distancia.



Font: <http://mathworld.wolfram.com>

Las proyecciones equidistantes son aquellas que conservan las **distancias**, o bien sólo desde el centro de la proyección o bien a lo largo de los círculos máximos (meridianos), pasando por un punto (Snyder, 1987, pág. 4). En cambio no es posible representar todas las distancias de manera correcta. Sin embargo, la mayoría de las proyecciones equidistantes tienen una o más líneas para las que se conserva la distancia. Se dice que estas distancias son verdaderas.

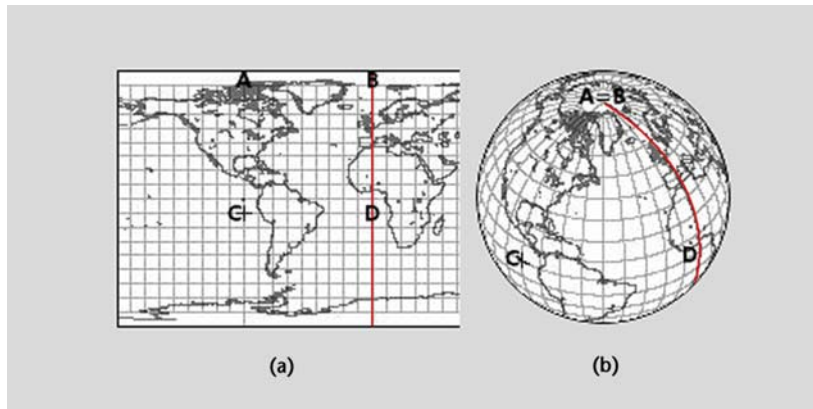
Dirección recomendada

Si os gusta la fotografía, como curiosidad, podréis ver cómo pueden aplicarse sobre imágenes algunas de las propiedades geométricas de las proyecciones que se tratan en el texto:

<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/image-projections.htm>

En la figura 15, el mapa **a** muestra el punto **C**, que parece mucho más lejos del punto **B** que del punto **D**, aunque, de hecho, todo punto sobre la línea **BD** está a la misma distancia de **C**. Podéis verlo más claramente cuando se representa sobre la esfera en **b**.

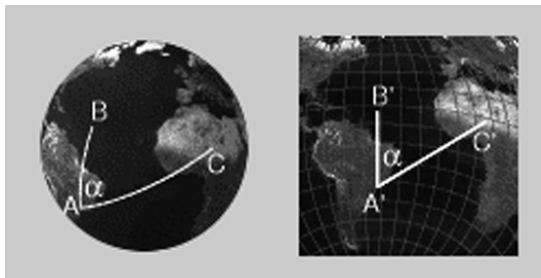
Figura 15



a. Todo punto sobre la línea **BD** en el mapa está a la misma distancia del punto **C**.
 b. Sobre la esfera se ve mucho más claramente la equidistancia sobre la línea **BD**.
 Fuente: <http://www.progonos.com/furuti>

4) Proyecciones acimutales, cenitales o de dirección verdadera

Estas proyecciones conservan las **direcciones** (y, por lo tanto, los ángulos o acimuts, aunque no necesariamente las distancias) de todos los puntos del mapa con respecto a un punto de referencia: el centro del mapa (Snyder, 1987, pág. 4).



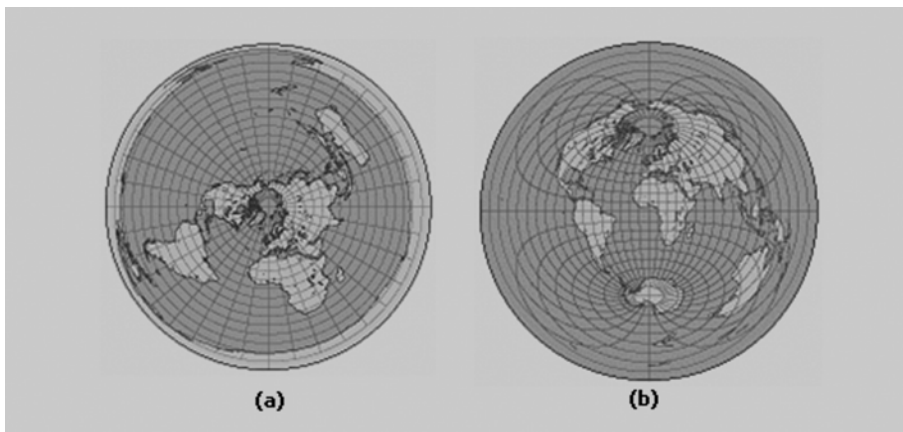
Dado un punto de referencia **A**, el acimut se conserva desde los puntos **B** y **C** sobre la esfera hasta los correspondientes puntos **B'** y **C'** sobre un mapa acimutal.
 Fuente: <http://www.progonos.com/furuti>

La figura 16 muestra por medio de tres puntos (**A**, **B**, **C**) sobre la esfera el acimut de **B** a **C**. El acimut es el ángulo formado por las líneas **AB** y **AC**. Estas líneas representan el camino más corto entre estos dos puntos sobre la esfera.

Como en el caso de las distancias, no todas las relaciones angulares pueden representarse correctamente en un mismo mapa, pero sí que es posible representar correctamente todas las relaciones angulares con respecto a un punto.

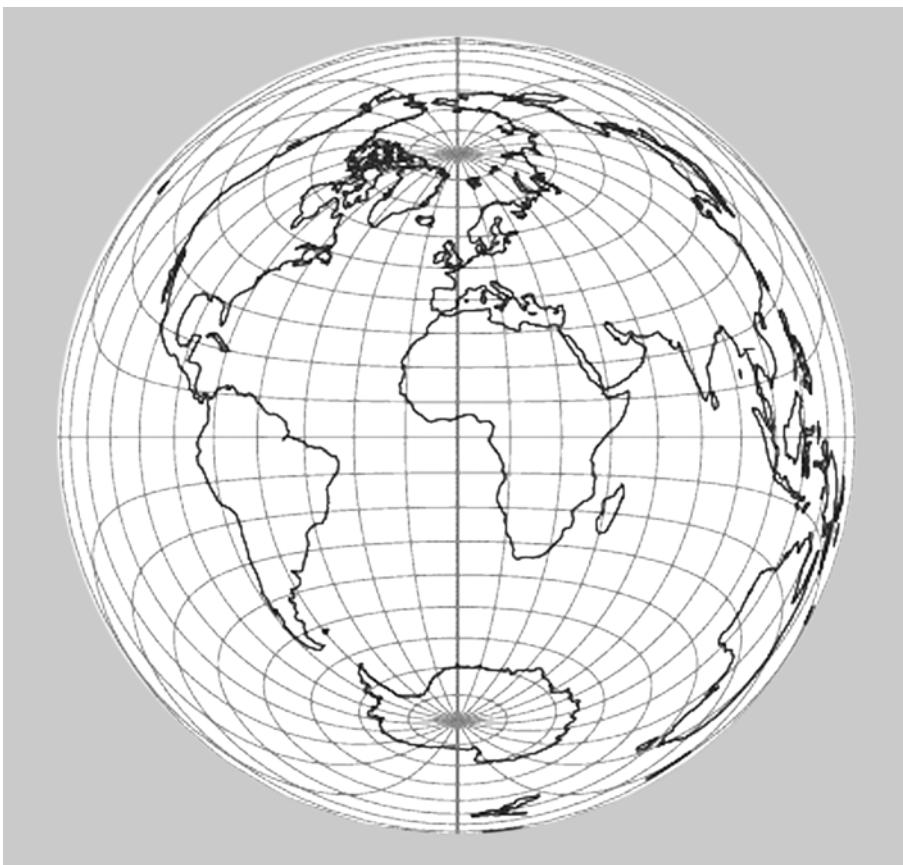
Los ejemplos clásicos de proyecciones acimutales son la ortográfica, la estereográfica y la gnómica. Hay muchas otras proyecciones acimutales, como la acimutal equidistante, que se muestra en la figura 17, o la *Lambert azimutal equal-area*, que podéis ver en la figura 18.

Figura 17. Proyección acimutal equidistante vista desde el polo Norte (a) y el ecuador (b)



Fuente: <http://www.progonos.com/furuti>

Figura 18. La proyección *Lambert azimutal equal-area* conserva los ángulos.



Fuente: <http://mathworld.wolfram.com>

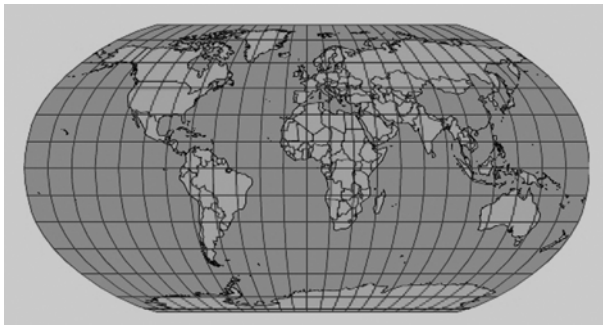
5) Proyecciones de compromiso

Mientras que muchas proyecciones intentan optimizar alguna de las cuatro propiedades geométricas anteriores, otras no intentan mantener ninguna en particular, sino que tratan de conseguir un balance entre propiedades diferentes. Así, por ejemplo, mientras que una proyección no puede ser ni conforme ni equivalente, puede mantener una distorsión mínima de las formas y las áreas en una región concreta. Estas proyecciones de compromiso suelen utilizarse como la base de mapas temáticos.

Proyección de Robinson

En la figura 19 podéis ver un ejemplo de este tipo de proyección, que se llama *proyección de Robinson*. Esta proyección distorsiona la forma, el área, la escala y la distancia.

Figura 19. La proyección de Robinson no conserva ninguna de las propiedades geométricas.



Fuente: <http://mathworld.wolfram.com>

Clasificación según la superficie de la que derivan

Una superficie no desplegable es aquella que no importa cómo se divida, que es imposible de desenrollar para que sea plana. La Tierra, como esferoide, se considera una superficie no desplegable. Para representar una superficie no desplegable en un plano, lo que se hace es proyectar la superficie no desplegable en una que sí lo sea, como el cono, el cilindro o el plano, que se pueden cortar para visualizarlas de forma plana.

Según la superficie geométrica de la que derivan, podemos establecer una clasificación de las proyecciones en **cónicas**, **cilíndricas** o **planas** (acimutales o cenitales).

Además, estas formas geométricas pueden ser o bien tangentes o bien secantes al esferoide:

- En el caso tangente: el cono, el cilindro y el plano se intersecan con el esferoide en una línea o en un punto.
- En el caso secante: el cono o el cilindro se intersecan con el esferoide en dos círculos, mientras que el plano sólo lo hace en un círculo.

Tanto si es tangente como secante, el lugar de contacto es importante porque define la línea o el punto de menor distorsión de la proyección cartográfica. Esta línea se llama **paralelo estándar**.

Por los mismos motivos es igualmente importante la línea de corte de la superficie desarrollable seleccionada. Cuando un cilindro o un cono se corta por un meridiano para producir la proyección final, el meridiano opuesto a la línea de corte se llama **meridiano central**.

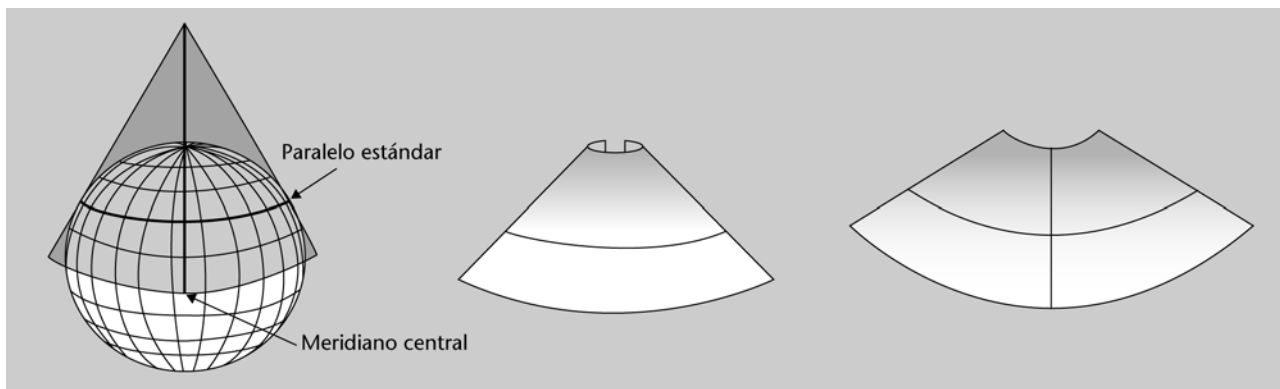
Tal como ya hemos dicho al principio de este subapartado, las proyecciones se clasifican en cónicas, cilíndricas o planas según la superficie de la que derivan. Ahora vamos a describir cada uno de estos tipos:

1) Proyecciones cónicas

En el caso cónico, podemos visualizar la Tierra proyectada en un cono tangente o secante, el cual se corta longitudinalmente para visualizarlo de forma plana. Los paralelos (líneas de latitud) se representan mediante arcos circulares concéntricos que aumentan a medida que se acercan al ecuador, y los meridianos (líneas de longitud) mediante líneas rectas en forma radial.

Normalmente, el vértice del cono se ubica en uno de los polos, de manera que el círculo de tangencia sea coincidente con uno de los paralelos, que llamaremos *paralelo estándar de la proyección*. Podéis verlo en la figura 20, donde se representa el caso tangente. La distorsión es mínima en torno al paralelo estándar y aumenta a medida que nos alejamos de este paralelo.

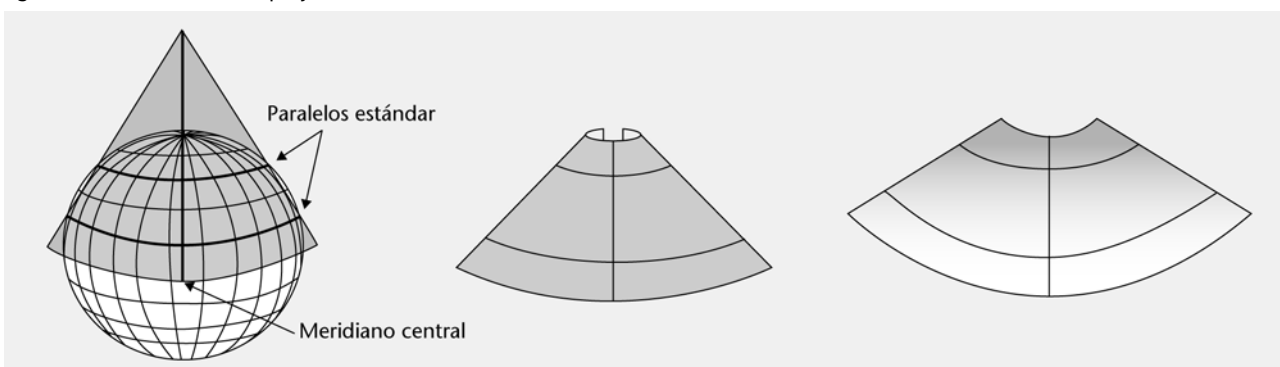
Figura 20. Derivación de las proyecciones cónicas tangentes



Fuente: ESRI

La figura 21 representa el caso secante, en el que el cono se interseca con la esfera en dos paralelos estándar.

Figura 21. Derivación de las proyecciones cónicas secantes



Fuente: ESRI

Este tipo de proyección se utiliza para hacer mapas de regiones de latitud media. El resultado general es una menor distorsión entre las zonas de tierra y de mar.

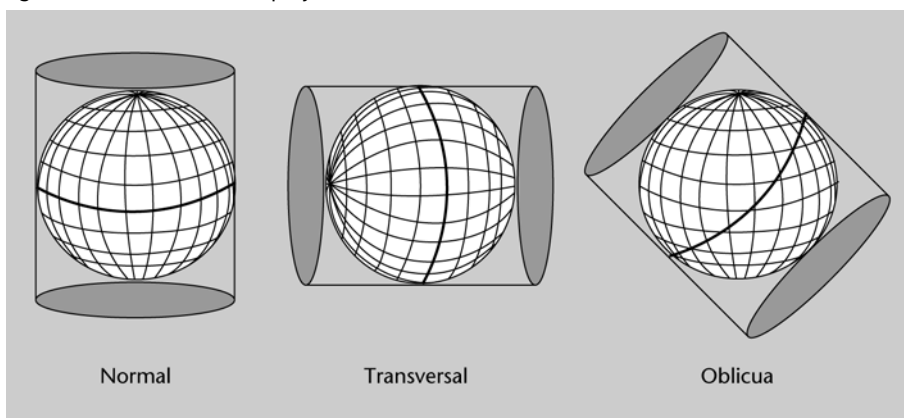
Versiones de tipo cónico hay muchas. La que se utiliza habitualmente es la llamada *Lambert conformal conic* (Lambert cónica conforme). Se usa en las cartas aeronáuticas, dado que meridianos y paralelos se cortan perpendicularmente y, por lo tanto, toda línea recta muestra rumbos verdaderos.

Otro tipo de proyección cónica muy utilizada es la policónica, que recubre el esferoide con un número infinito de conos cada uno de los cuales tiene su propio paralelo estándar.

2) Proyecciones cilíndricas

En el caso cilíndrico, podemos visualizar la Tierra proyectada en un cilindro tangente o secante, el cual se corta longitudinalmente para visualizarlo de forma plana. La mayoría de las proyecciones cilíndricas se derivan de manera tal que el cilindro toca el globo terráqueo en el ecuador (punto de tangencia, donde no hay distorsión). En la figura 22 podéis ver las diferentes posiciones del cilindro respecto de la esfera, para generar diferentes zonas de tangencia.

Figura 22. Derivación de las proyecciones cilíndricas



Fuente: ESRI

En este tipo de proyección, los paralelos se muestran como líneas rectas horizontales y los meridianos como líneas rectas verticales. Paralelos y meridianos se distribuyen uniformemente y se cruzan ortogonalmente, es decir, en ángulo recto.

En esta proyección, una línea recta entre dos puntos cualesquiera sigue una única dirección llamada **rumbo**. Las líneas de rumbo o **loxodromias** son líneas de dirección constante o, dicho de otra manera, son líneas que cortan cada meridiano en un ángulo constante.

Las líneas de rumbo se utilizan mucho en la creación de cartas náuticas, dado que corresponden a la trayectoria marcada por una posición constante en la brújula. Estas líneas marcan la ruta más fácil entre dos puntos dados, y cualquier otro camino requerirá cambios de dirección frecuentes.

Dirección recomendada

Para ver interactivamente la deformación de la proyección Lambert cónica conforme, visitad el siguiente enlace:

http://www.uff.br/mapprojections/LambertConformalConic_en.html

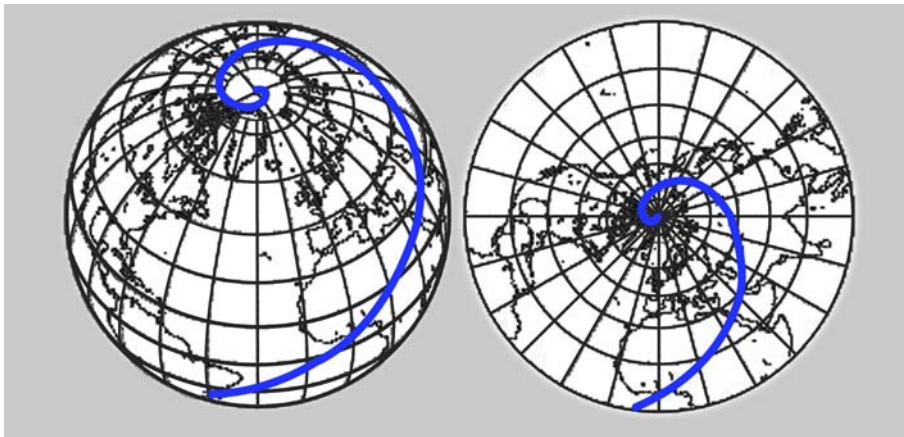
Rumbo

El rumbo es la dirección de un objeto con respecto a un observador. Se mide como el ángulo horizontal en relación con el norte. La dirección siempre se toma en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte, que representa el origen como 0°.

En la figura 23 podéis ver representada una línea de rumbo sobre la esfera terrestre. Cualquier línea de rumbo es parte de una espiral que tiene el polo como punto **asintótico**. El motivo es que la distancia entre dos puntos de esta curva que están sobre el mismo meridiano disminuye a medida que aumenta la latitud del ecuador al polo.

Un punto asintótico es aquel al que se tiende de manera infinita pero al que nunca se llega.

Figura 23. Diferentes proyecciones de la representación de una línea de rumbo (o loxodromia) sobre la esfera terrestre



Fuente: <http://www.progonos.com/furuti>

Esta proyección representa bien la zona entre el ecuador y los trópicos y después amplía su distorsión.

Cuando se usa un único cilindro para proyectar toda la superficie terrestre en un solo mapa, se dan distorsiones muy significativas en latitudes muy grandes, donde los paralelos se alejan mucho y los polos no se pueden representar. La proyección conforme de Mercator es el mejor ejemplo de esta clase.

3) Proyecciones planas o acimutales

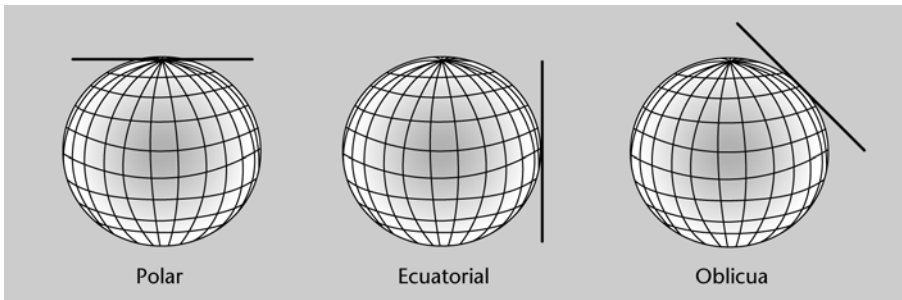
En las proyecciones planas, una porción de la superficie de la Tierra se transforma desde la perspectiva de un punto en una superficie plana.

En la figura 24 podéis ver las posiciones más usuales del plano respecto de la esfera. Teóricamente, el punto de tangencia puede ser cualquier punto del planeta, aunque normalmente se utiliza el polo Norte, el polo Sur o algún punto del ecuador. La proyección mantiene sus propiedades geométricas en torno al punto de tangencia y las distorsiones aumentan a medida que nos alejamos de su punto de origen.

En la figura 25 se puede ver cada uno de los tipos en los que se puede clasificar esta proyección según la localización del punto de radiación:

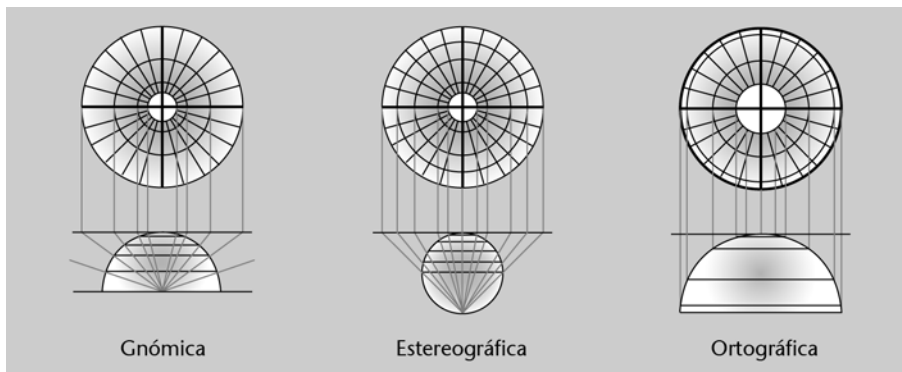
- **Gnómico:** si el punto de perspectiva es el centro de la Tierra.
- **Estereográfico:** si el punto de perspectiva es el opuesto al punto de tangencia.
- **Ortográfico:** si el punto de perspectiva está en el infinito.

Figura 24. Derivación de las proyecciones acimutales



Fuente: ESRI

Figura 25. Diferentes tipos de proyecciones azimutales según el punto a partir del cual se genera la perspectiva



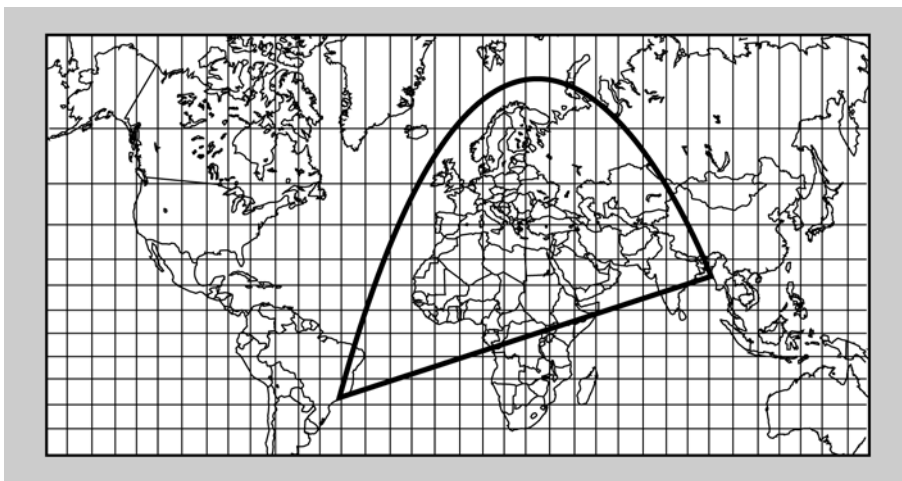
Fuente: ESRI

Las proyecciones planas secantes que cortan el centro de la Tierra generan líneas llamadas *geodésicas* o *círculos máximos*.

Recordad que una **geodésica** es el camino más corto entre dos puntos sobre la Tierra, propiedad que se usa en navegación aérea. Eso explica, tal como podéis ver en la figura 26, donde la geodésica aparece como un arco de curva, por qué un avión que vuela desde Brasil hasta Japón toma una ruta próxima al polo Norte. Fijaos en la línea recta correspondiente a la **loxodromia** que une este mismo trayecto.

Recordad que el concepto de *geodésica* se definió en el subapartado 1.2.1 de este módulo, donde se explican las coordenadas geográficas.

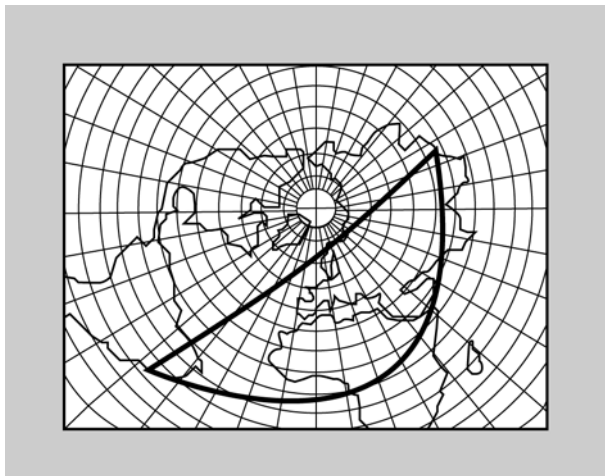
Figura 26. Representación en la proyección de Mercator de una geodésica (línea curva) y de una loxodromia (línea recta)



Fuente: <http://www.progonos.com>

Según la figura 26, podría parecer que el camino más corto entre dos puntos de la esfera terrestre es dado por la loxodromia y no por la geodésica. Para aclarar eso, fijaos en la figura 27, donde podéis ver la misma geodésica y loxodromia representadas en la figura 26 y cómo en esta proyección se ve claramente la geodésica como el camino más corto entre los dos puntos.

Figura 27. Representación en proyección acimutal equidistante de una geodésica (línea curva superior) y de una loxodromia (línea curva inferior)



Fuente: <http://www.progonos.com>

Estas proyecciones no son las únicas que generan líneas geodésicas, pero merecen especial mención sobre este punto dado que representan las geodésicas como líneas rectas.

Para acabar, sólo queda comentar que las **proyecciones modificadas** son versiones de una determinada proyección a la que se añaden determinados cambios, o bien para modificar o reducir el patrón de distorsión, o bien para añadir más paralelos estándar.

Hay muchas otras proyecciones, algunas de las cuales son muy comunes, que no pueden relacionarse fácilmente con ninguna de las formas geométricas anteriores. Éstas se catalogan como **proyecciones individuales o únicas**.

1.3.3. Parámetros de una proyección

En el subapartado anterior hemos visto los diferentes tipos de proyecciones y sus propiedades. Ahora vamos a definir los parámetros asociados a una proyección dada como, por ejemplo, el centro de proyección o el factor de escala, que nos definirán la localización de un punto determinado sobre la Tierra.

El valor de los parámetros de una proyección nos da una idea de su distorsión. Si estamos trabajando en una zona de Australia, el centro de la proyección que escogemos para representar los datos no podrá ser el (0, 0), que es el punto de intersección del ecuador con el meridiano de Greenwich. Habrá que buscar un centro de proyección más adecuado al área de trabajo, como el (138°, -24°).

Dirección recomendada

Para profundizar en la formulación matemática de las proyecciones cartográficas de uso más común, podéis consultar el enlace <http://mathworld.wolfram.com/topics/MapProjections.html>

La gran diversificación de proyecciones se debe al hecho de que se definen de manera que minimicen la distorsión dentro de un área determinada. Hay parámetros que se han diseñado para cartografiar continentes; otros para zonas más pequeñas como países o regiones. Hemos visto que el total de la distorsión de una proyección aumenta a medida que nos alejamos de su centro. Por esta razón, tiene sentido definir una misma proyección con diferentes parámetros que la localicen en el lugar de interés.

Escoger una proyección centrada en el lugar que queremos cartografiar nos asegura la mínima distorsión para aquella zona.

Cada proyección tiene un conjunto de parámetros que la definen. En general, su objetivo es el de describir el área de alcance de la proyección. A continuación vamos a describir los parámetros más comunes:

- **Falso este y falso norte:** valor lineal arbitrario que se aplica al origen de las coordenadas X , Y respectivamente, para asegurar que todos los valores en X , Y sean positivos.
- **Meridiano central o longitud origen:** define el origen de coordenadas X .
- **Paralelo central o latitud origen:** define el origen de coordenadas Y .
- **Paralelo estándar 1 y paralelo estándar 2:** definen las líneas de latitud donde la escala tiene valor 1,0.
- **Factor de escala:** valor sin unidades asociadas que se aplica al punto o línea central de una proyección. El factor de escala reduce la distorsión total de la proyección en el área de interés.

1.3.4. Elegir la proyección adecuada

La selección de una proyección u otra depende del "propósito" con el que se haga un mapa. Para mapas de carreteras nos interesa que se mantengan las distancias (equidistantes) y en los mapas temáticos es importante que se conserve el tamaño (equivalentes) y la forma (conformes) de las regiones cartografiadas.

Otras consideraciones para elegir la mejor proyección son la extensión y la localización del área de las que se quiere hacer el mapa. En referencia a la **extensión**, cuanto mayor sea el área, más importancia tiene la curvatura de la Tierra y, por lo tanto, mayor es la distorsión de ciertas propiedades. En relación con la **localización** (figura 28) de la región a cartografiar, podemos aplicar la siguiente regla descrita por Mailing (1992):

- Para latitudes bajas (regiones ecuatoriales y tropicales), se usan proyecciones cilíndricas.
- Para latitudes medias, se usan proyecciones cónicas.
- Para regiones polares, se usan proyecciones planas.

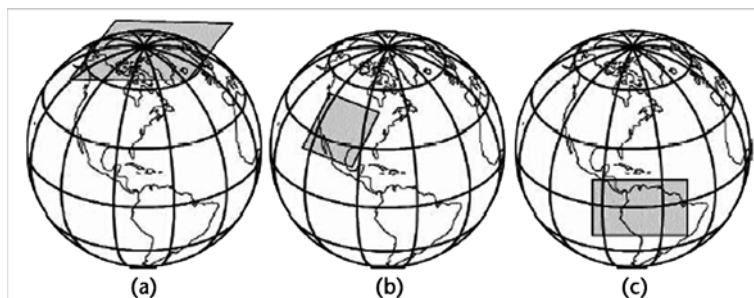
Mapas temáticos

Los mapas temáticos representan variables específicas del territorio. Se centran en la información de un tema concreto y pueden incluir información adicional del relieve.

Referencia bibliográfica

D. H. Mailing (1992). *Coordinate Systems and Map Projections* (2.ª ed., 476 págs.). Oxford: Pergamon Press.

Figura 28. Localización de diferentes zonas a cartografiar



a. Zonas polares. b. Latitudes medias. c. Zonas ecuatoriales
Fuente: D. H. Mailing (1992)

Implicito en esta regla tenemos el hecho de que estas zonas se proyectan en las áreas en que cada proyección tiene la menor distorsión:

- Las cilíndricas no tienen distorsión en el ecuador y ésta se incrementa a medida que nos acercamos a los polos.
- Las cónicas no tienen distorsión a lo largo de algún paralelo entre el ecuador y el polo, y la distorsión aumenta a medida que nos alejamos de este paralelo estándar.
- Las acimutales únicamente no tienen distorsión en su punto central, y las mayores distorsiones se dan en los extremos del mapa.

Si cada lugar que queremos cartografiar estuviera dentro de una de estas zonas de distorsión mínima, no tendríamos ningún problema. La experiencia nos demuestra, sin embargo, que el espacio geográfico no se comporta de esta manera y que muchos lugares siempre quedan fuera de las áreas menos distorsionadas definidas por las proyecciones básicas. Una manera sencilla de resolver eso es cambiar el **aspecto de la proyección**. Ello traslada el patrón de distorsión del espacio de proyección de manera que las áreas de menor distorsión se mueven a otra zona geográfica. Incluso teniendo en cuenta esta flexibilidad, las opciones de que disponemos son bastante limitadas. Mailing sugiere que pueden hacerse varias modificaciones para que una proyección funcione mejor:

- Redistribución de las escalas y utilización de más de una línea de distorsión cero, como en el caso secante.
- Imposición de condiciones especiales en la frontera.
- Utilización de la proyección más de una vez para mapas interrumpidos.
- Combinación de proyecciones.

Aunque podemos tener éxito en la minimización de la distorsión en general, debemos considerar las propiedades especiales de cada proyección. Para cada caso concreto del mapa que se quiere realizar, hay que saber si se necesita la propiedad de conformidad, equivalencia o algún tipo de compromiso entre las propiedades. Como hemos comentado anteriormente, para la navegación, por ejemplo, es absolutamente necesaria la conformidad; y en **mapas temáticos**, es necesaria la equivalencia.

Aspecto de una proyección

Una proyección particular puede utilizarse con diferentes aspectos: polar, ecuatorial (o normal) y oblicuo. Elegir un aspecto u otro para un mapa es lo mismo que decir que escogemos la orientación de la superficie de proyección, a saber, el origen de coordenadas.

Dirección recomendada

Para consultar las propiedades de las proyecciones cartográficas más usuales, podéis consultar el siguiente enlace: <http://erg.usgs.gov/isb/pubs/MapProjections/projections.html>

Al final debemos escoger la proyección que minimice la distorsión y las propiedades especiales; aunque a veces no es necesario considerar las propiedades especiales, como en el caso de escalas muy grandes, donde las diferencias introducidas por la distorsión no son apreciables.

1.3.5. Estudio especial para el sistema de coordenadas UTM

En este punto ya tenemos una visión general sobre el concepto de proyección cartográfica, hemos visto los tipos principales y los parámetros más comunes que la definen para una zona determinada y también hemos visto los criterios para poder escoger la más adecuada a nuestros propósitos. Ahora vamos a estudiar con más profundidad una de las proyecciones de uso más común: la proyección transversal universal de Mercator (*universal transversa Mercator*, UTM).

En este subapartado vais a ver cómo se genera la proyección UTM y qué la distingue con respecto a la proyección de Mercator y a la proyección transversal de Mercator. Estudiaremos las características propias de la proyección UTM para finalmente ver cómo debe determinarse el valor de las coordenadas UTM para un punto de un mapa.

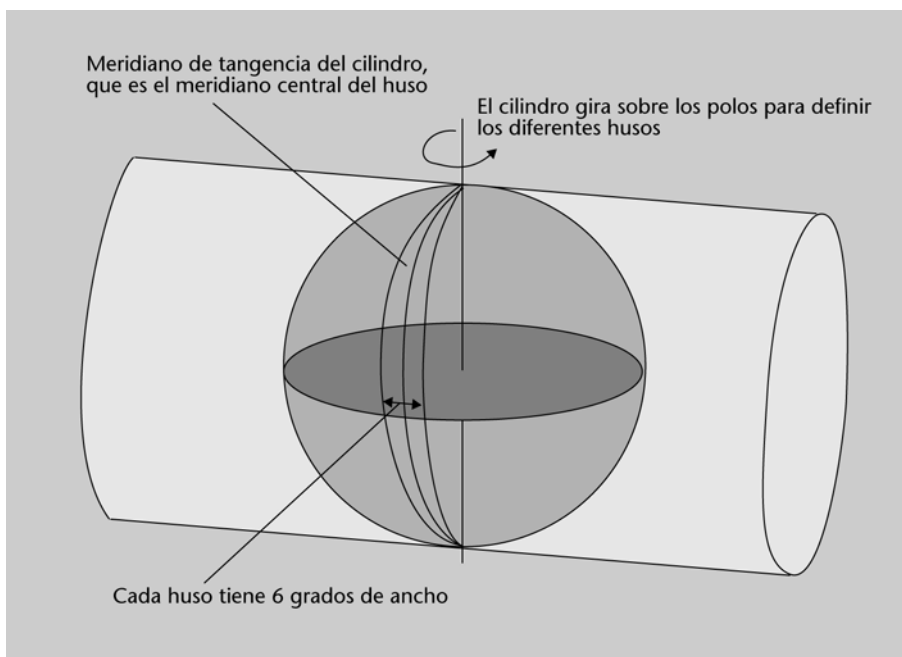
Cada huso UTM es una proyección diferente

La proyección de **Mercator** es una proyección cilíndrica y, por lo tanto, resulta de la proyección de una esfera (la Tierra) en un cilindro tangente a un meridiano central, en particular al ecuador de la Tierra. En las zonas próximas al ecuador, la proyección de Mercator presenta la mínima distorsión, que aumenta a medida que nos alejamos del meridiano central.

El comportamiento de la distorsión es una gran limitación a la utilidad de la proyección de Mercator, ya que sólo permite cartografiar las zonas próximas al ecuador. Ahora bien, ¿y si giramos el cilindro?

Fijaos en la figura 29 para ver que, si giramos el cilindro sobre el que se genera la proyección de Mercator, de manera que sea tangente a la Tierra en un meridiano (línea longitudinal) en vez del ecuador, se genera la proyección **transversal de Mercator**. De esta manera, podremos cartografiar zonas de la Tierra que se extienden de norte a sur a lo largo de la línea de tangencia y no sólo que sean próximas al ecuador. Los mapas que están contenidos dentro de la estrecha zona vertical en torno al meridiano de tangencia están libres de distorsión. Según eso, cualquier proyección transversal de Mercator generada a partir de un meridiano como línea de tangencia es útil sólo cerca del meridiano seleccionado.

Figura 29. Proceso de generación de los sesenta husos UTM



Fuente: <http://www.gabrielortiz.com>

El sistema **universal transversal de Mercator** resuelve el problema planteado anteriormente, dado que permite cartografiar no sólo las zonas próximas al ecuador (Mercator) o las zonas próximas a un único meridiano de tangencia (transversal Mercator), sino cualquier zona de la Tierra. Para poder hacerlo, define sesenta proyecciones estándar diferentes, de manera que cada una es una proyección transversal Mercator con un meridiano diferente como línea de tangencia. Cada línea central define un huso UTM, que es la manera rápida de reconocer cada una de las proyecciones obtenidas. Si se rota el cilindro sesenta veces, con separaciones de seis grados para recubrir los 360 grados de la esfera terrestre, el sistema UTM nos asegura que todos los puntos sobre la Tierra estarán como máximo a tres grados de una línea central de tangencia de una de las sesenta proyecciones cilíndricas.

Cada **huso** se corresponde con las posiciones geográficas que ocupan todos los puntos comprendidos entre dos meridianos, que en el sistema UTM hemos visto que son de seis grados de amplitud (longitud). Los husos se generan a partir del meridiano de Greenwich, 0° a 6° E y W, 6° a 12° E y W... con un meridiano central equidistante tres grados de longitud de los extremos de cada huso. Este meridiano central se corresponde con la línea central de tangencia de cada proyección transversal de Mercator definida.

Resumiendo, para cartografiar cualquier punto sobre la Tierra en el sistema UTM, hay que seleccionar la línea central del huso UTM más próxima al punto y utilizar la proyección cilíndrica de ese huso.

Como acabamos de ver, cada huso UTM es una proyección transversal de Mercator diferente. En el subapartado siguiente describiremos las características propias de los husos UTM para hacer un buen uso de ellos.

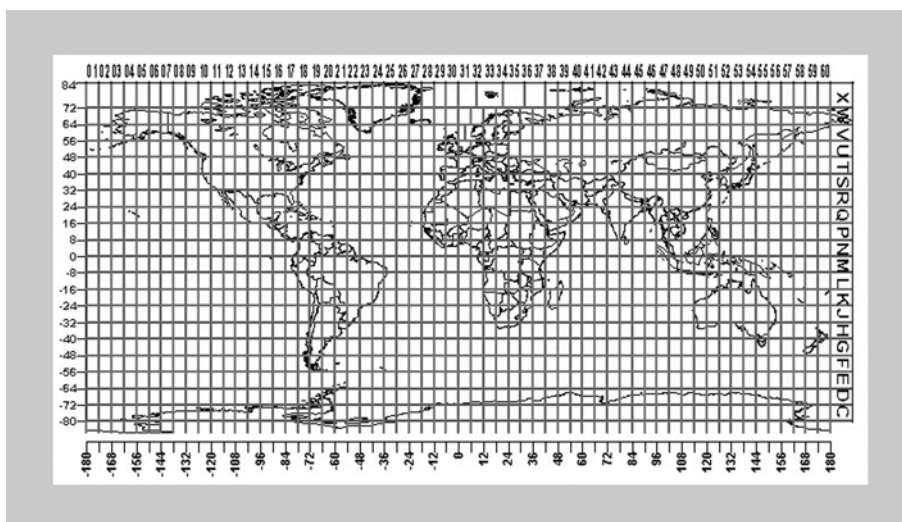
Características de los husos del sistema UTM

Acabamos de ver que el sistema de coordenadas UTM (que es un sistema de coordenadas planas) divide la superficie de la Tierra en sesenta husos longitudinales para reducir la distorsión. Cada huso tiene seis grados de amplitud y están numerados de oeste a este del 1 al 60 empezando en 180° W.

Este sistema no se usa en las regiones polares por las grandes distorsiones que se producen con éste. En dichas regiones normalmente se utiliza otro sistema llamado *polar estereográfico universal (universal polar stereographic, UPS)*, que no estudiaremos en detalle.

Cada uno de los sesenta husos se divide en veinte zonas latitudinales que empiezan en los 80° sur y se denota con las letras C a X, con la omisión de las letras I, LL y O. Cada una tiene 8° de sur a norte, menos la zona X, que tiene 12°. Podéis ver la distribución de husos y zonas UTM en todo el mundo en la figura 30.

Figura 30. Distribución de las zonas del sistema de coordenadas UTM en todo el mundo



Fuente: Peter H. Dana. *The Geographer's Craft*.

A continuación vamos a describir el sistema de coordenadas UTM para cada huso. Fijaos en la figura 31, donde se muestra un huso UTM. Cada huso tiene su propio meridiano central y se divide por el ecuador en dos mitades: norte y sur. Definiremos como origen de coordenadas de cada huso la intersección entre su meridiano central y el ecuador.

Para eliminar coordenadas negativas, el sistema de coordenadas modifica el valor de las coordenadas en el origen con los valores que llamamos *falso este* y *falso norte*. El valor dado al meridiano central es el falso este y el valor asignado al ecuador es el falso norte, que se aplican tal como se describe a continuación:

- Las coordenadas del este se miden a partir del meridiano central aplicando un falso Este de 500.000 metros, dado que los husos miden unos 900.000 metros en su parte más ancha (la amplitud de 6° de un huso en el ecuador es de

Uso del sistema UTM

En la práctica, excepto en los entornos militares, el complejo sistema de veinte subzonas de norte-sur designado con letras se utiliza raramente. Normalmente encontraréis que sólo se especifica si las coordenadas UTM están en el hemisferio norte o en el sur de un huso concreto.

The Geographer's Craft: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/contents.html>

Recordad los conceptos de *falso norte*, *falso este* y *factor de escala* que estudiamos en el subapartado 1.3.3 de este módulo.

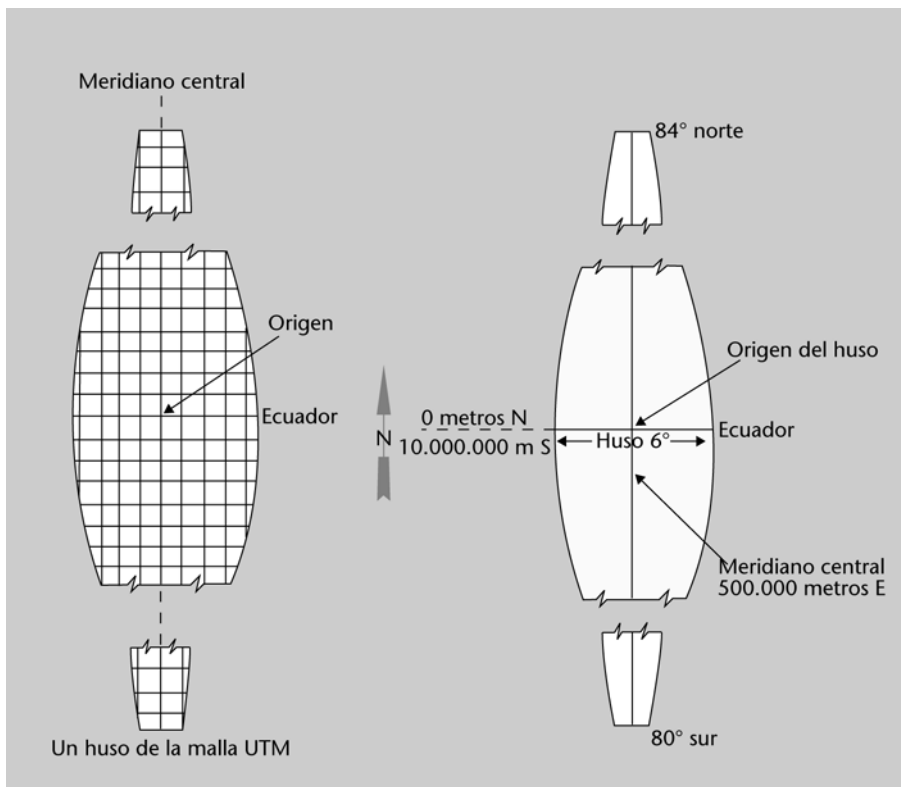
aproximadamente 900 km). De esta manera nos aseguramos de que todas las coordenadas estarán al este del origen y, por lo tanto, serán positivas.

- Las coordenadas del norte se miden a partir del ecuador.
- Para las coordenadas del hemisferio sur hay que aplicar un falso Norte de 10.000.000 metros, que mueve el origen al polo Sur, y eso nos asegura que todas las coordenadas en el hemisferio sur serán positivas.
- Para el caso de las coordenadas del hemisferio norte, no hay que aplicar ningún falso norte porque, como el origen es el ecuador, todas las coordenadas del hemisferio norte están en el norte del origen y siempre serán positivas.

Dirección recomendada

Si querés profundizar más en los detalles de las propiedades de los usos UTM, podés consultar el enlace http://welcome.warnercnr.colostat.edu/class_info/nr502/lg3/datums_coordinates/utm.html

Figura 31. Esquema de la construcción de un huso UTM



Fuente: U. S. Geological Survey (USGS)

Ejemplo

Las coordenadas UTM huso 31 N del monumento a Colón en Barcelona son 431.337 m, 4.581.004 m. Como las coordenadas de la X son menores de 500 km, eso nos indica que están al oeste del meridiano central de su huso, y en caso de no aplicarse el falso este tendrían el valor negativo -68.663 m. Dado que estamos en el hemisferio norte, no se ha aplicado el falso norte a la coordenada de la Y.

U. S. Geological Survey:
<http://www.usgs.gov>

Con el fin de reducir la distorsión en el área que recubre cada huso, se aplica un factor de reducción de escala de 0,9996 al meridiano central. Con este factor de escala, las líneas de los extremos de la zona, que están situadas aproximadamente a 180 km al este y al oeste del meridiano central, tienen un factor de escala igual a 1,0.

Determinación del valor UTM para un punto de un mapa

En coordenadas UTM una posición se define por tres elementos: el huso en el que se encuentra, las coordenadas *E* (eje horizontal) y *N* (eje vertical), y el hemisferio en el que se encuentra. Estas coordenadas son las distancias lineales en metros en los ejes *E* y *N* de referencia dentro de cada huso y no coinciden con las coordenadas geográficas latitud/longitud.

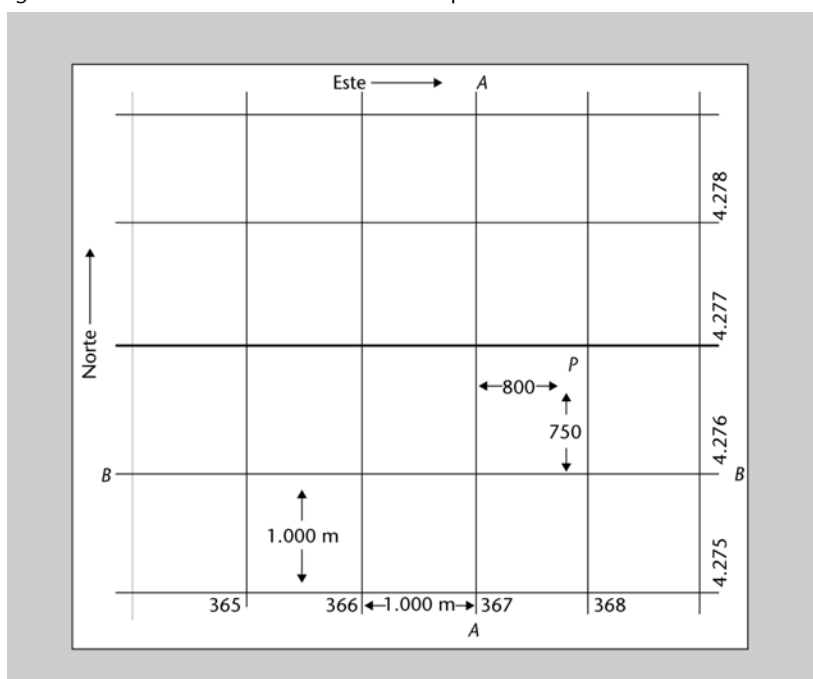
Encontrar las coordenadas UTM de una posición sobre un mapa no tiene mucha dificultad. Todos los mapas UTM incorporan una cuadrícula kilométrica impresa. En los márgenes del mapa se puede ver la numeración de las coordenadas en incrementos de 1.000 metros, por ejemplo.

Para indicar nuestra posición, lo primero que hay que saber es el huso en el que estamos, y eso siempre nos lo indica el mapa con el que estamos trabajando. La península ibérica, por ejemplo, ocupa los husos 29, 30 y 31 Norte.

En la figura 32 podéis ver una cuadrícula de coordenadas UTM con la numeración de las coordenadas en incrementos de 1 km. Calcularemos las coordenadas del punto *P* indicado en la figura. Debéis tener en cuenta que las distancias se miden en el mapa en metros y a la escala del mapa. El origen para hacer estas mediciones serán las líneas del sur y del oeste de la cuadrícula más próximas al punto a determinar.

Para dar las coordenadas del punto *P*, primero hay que indicar la coordenada *E*, que sería 367.000 metros más los 800 metros al este, y después la coordenada *N*, que sería 4.276.000 metros más los 750 metros al norte de la cuadrícula. Por lo tanto, nuestro punto *P* está situado en las coordenadas UTM 367.800 *E* y 4.276.750 *N*.

Figura 32. Cálculo de las coordenadas UTM del punto *P*



Fuente: U. S. Geological Survey (USGS)

Cuatro millones

Hasta no hace mucho, para ahorrar memoria, los SIG no almacenaban el 4 correspondiente a los 4.000.000 de las coordenadas de la península, porque todas las coordenadas lo tenían. Más adelante, cuando ya se almacenaba, se extendió una pregunta muy común entre los usuarios de SIG y cartografía: ¿"Con" los cuatro millones o "sin"?

Los husos UTM no se pueden mezclar

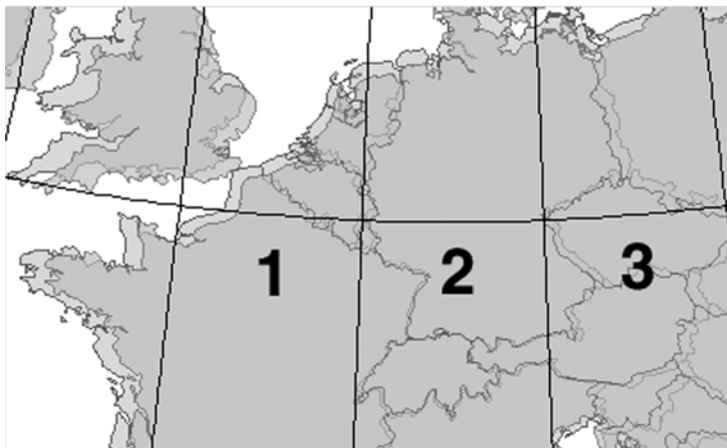
El sistema UTM es el más extendido para navegación terrestre, por su consistencia en toda la extensión terrestre. Además, disponemos de gran cantidad de mapas topográficos con coordenadas UTM, que nos serán muy útiles para trabajar con GPS.

Por otra parte, el hecho de tener un área que no está completamente contenida dentro de un único huso nos da problemas al cruzar los límites de máxima distorsión. Y además, no tenemos relaciones matemáticas sencillas entre las coordenadas de un huso y los husos adyacentes.

Los usuarios noveles del sistema UTM normalmente no se dan cuenta de que cada huso UTM es una proyección diferente que usa un sistema de coordenadas distinto. A menudo intentan combinar en un único mapa diferentes mapas que se han creado en diferentes husos UTM esperando que el mapa obtenido muestre los objetos con poca distorsión tal como lo hacen los mapas originales para cada huso. Generalmente, el motivo para hacerlo es el deseo de centrar el mapa en una región que abarca más de un huso UTM. El problema es que el diseño del sistema UTM supone que los objetos de diferentes husos siempre se cartografiarán en mapas diferentes.


Si se combinan objetos de diferentes husos UTM en un mismo mapa que se proyecta utilizando sólo uno de los husos UTM, obtendremos que los datos o regiones que no son del huso que se ha escogido para realizar la proyección se mostrarán con mucha distorsión. Como ejemplo, podéis ver la figura 33, que muestra en gris claro un trozo de Europa en el sistema UTM centrado en el área marcada con un 2. Superpuesto en el mapa, tenemos en gris más oscuro la misma área geográfica de Europa en proyección ortográfica centrada en el mismo punto que el área 2.

Figura 33. Distorsión obtenida por la combinación de diferentes husos UTM



Fuente: U. S. Geological Survey (USGS)

Sabemos que la proyección ortográfica representa toda el área cartografiada con exactitud; por lo tanto, el mapa UTM muestra un alto nivel de imprecisión en las zonas en las que no está centrada la proyección, como las zonas 1 y 3. Notad la distorsión de la costa de Francia, que parece tocar la costa inglesa.



Recordad que la proyección ortográfica es una proyección acimutal que conserva los ángulos con respecto a un punto central (acimut), tal como vimos en el subapartado 1.3.2.

El sistema UTM se diseñó para cartografiar objetos contenidos en un único huso.

Si se necesita combinar diferentes husos UTM, la solución más apropiada es escoger una proyección diferente para el mapa entero que proporcione una distorsión baja en toda el área de interés. Recordad que, aunque ninguna proyección es perfecta para todos los propósitos, hay algunas que son mejor que otras según el objetivo del mapa que estamos confeccionando.

1.4. Concepto de georreferenciación

Hemos visto que uno de los objetivos fundamentales de la geodesia es la determinación de posiciones. Para alcanzar este objetivo, necesitamos algún método para definir de manera única la localización de los objetos y lugares en la Tierra. Este método es el que se llama **georreferenciación**.

La georreferenciación es el proceso que se utiliza para relacionar la posición de un objeto o superficie en un plano con su posición sobre la superficie terrestre.

La georreferenciación relaciona información de distinta índole con una única posición sobre la superficie de la Tierra.

Georreferenciación incorrecta de los datos

Una de las fuentes de error más comunes en un SIG está relacionada con una georreferenciación incorrecta de los datos. Eso es debido a la misma naturaleza de los SIG, que son capaces de combinar datos de diferentes fuentes.

Para georreferenciar cualquier objeto en la superficie terrestre es necesario definir una superficie de referencia, un datum geodésico y un sistema de referencia. En los siguientes subapartados explicaremos con detalle cada uno de estos aspectos.

1.5. Superficies de referencia terrestres

Visto que nuestro objetivo es la georreferenciación, ahora lo que debemos hacer es materializarlo. Para ello necesitamos una superficie de referencia que sea una aproximación de la forma real de la superficie terrestre.

La forma de la Tierra es irregular y muy compleja. Además, está condicionada por muchos factores: la fuerza gravitatoria, la presión de la radiación solar, su composición viscosa, etc. Estos factores hacen que la forma de la Tierra no sea estática, sino que varíe con el tiempo de forma dinámica. Por lo tanto, hace falta una representación simplificada de su forma para poder trabajar con ella,

es decir, un modelo. Hoy en día, se trabaja con dos modelos de la Tierra: el geode y el elipsoide. A continuación pasamos a describirlos.

1.5.1. El geode

El proceso de formación de la cartografía implica una abstracción de la realidad. Necesariamente, debemos simplificar la complejidad de la realidad para poder introducirla y dibujarla sobre un mapa. Quizás uno de los procesos más profundos en el plano teórico consiste en la simplificación de la superficie de referencia con la que trabajaremos.

Esta necesidad de encontrar una primera simplificación de la superficie de referencia de la Tierra es la que ha hecho que durante años los expertos en geodesia se hayan concentrado en la investigación de la superficie que hoy llamamos *geode*. Podemos imaginar el **geode** como la superficie que observaríamos si el mar estuviera completamente en calma y sin mareas, y que imaginariamente se extendería de manera natural por debajo de la plataforma continental. Se trata de una superficie equipotencial que coincide con la del nivel medio del mar.

Una **superficie equipotencial** es aquella en la que el potencial de la gravedad es constante en todos sus puntos. O bien, dicho de otra manera, es la superficie donde la dirección de la gravedad es perpendicular a todos sus puntos.

Definimos *geode* como la superficie equipotencial que se corresponde con el nivel medio de los océanos.

Para calcular el geode hemos dicho que debemos imaginarnos una especie de mar medio. Ya hemos dicho que el mar no siempre tiene el mismo nivel, entonces, ¿qué nivel medio tomamos para este mar? El **nivel medio del mar** es el nivel medio de la superficie del océano entre las mediciones que tenemos de los niveles máximo y mínimo. Usamos el nivel medio del mar como un plano sobre el cual podemos referenciar o describir las alturas del terreno que hay en el plano, por encima o por debajo.

Por razones de conveniencia, se establece el concepto de *nivel medio del mar* (NMM), o bien en inglés *mean sea level* (MSL), como la superficie que mejor se adapta al geode.

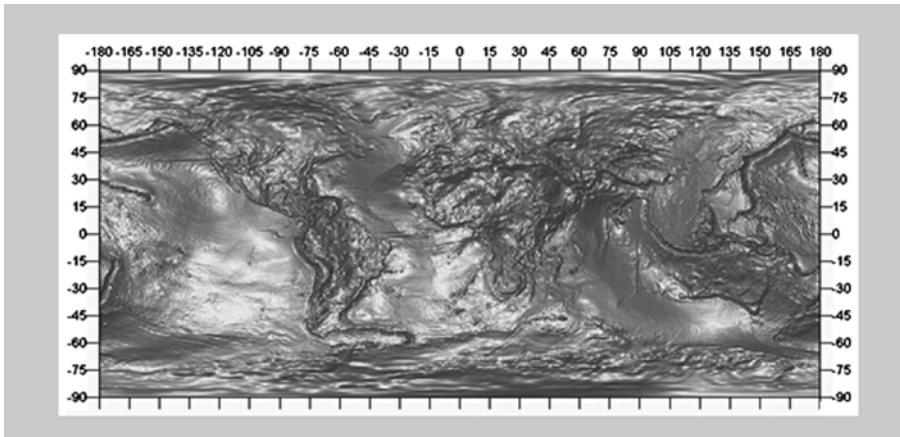
Según lo que acabamos de ver, podemos volver a definir el concepto de *geode* de la manera siguiente.

Definimos *geode* como la superficie donde la dirección de la gravedad es perpendicular en todos los lugares y se corresponde con el valor de la gravedad que se experimenta en el nivel medio del mar.

Ejemplo

En la figura 34 podéis ver un modelo de alturas del geode global terrestre WGS84 que publica la agencia de cartografía del Departamento de Geodesia y Geofísica de los Estados Unidos, U. S. National Defense and Mapping Agency (NIMA). Esta figura presenta una malla de puntos con las ondulaciones del geode cada $0,25^\circ$ como un modelo del relieve iluminado con un único foco de luz situado a 45° W de longitud y 80° N de latitud.

Figura 34. Modelo de ondulaciones del geode WGS84 publicado por la NIMA



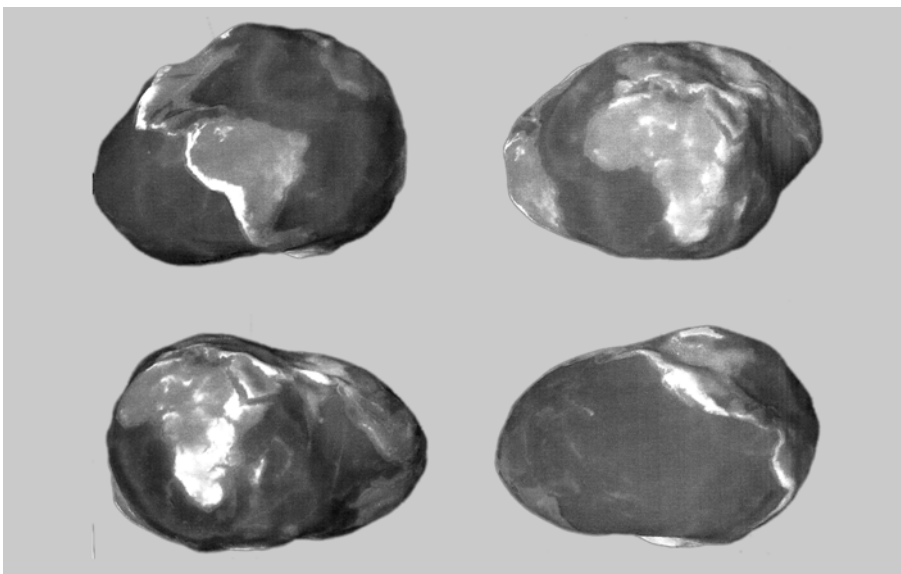
Fuente: Peter H. Dana. Departamento de Geografía, Universidad de Texas en Austin.

Cabe decir también que hay muchos elementos que dificultan definir la superficie que llamamos *geode*. Y es que elementos como la diferente densidad de los materiales, la dinámica de fluidos del magma terrestre, etc., hacen que la gravedad presente un patrón irregular y que sea muy difícil definir la superficie equipotencial de la que ya hemos hablado antes.

Todos estos factores hacen que medir un geode no sea nada fácil. El modelo actual de geode se basa en los datos de la gravedad recogidos por todo el planeta de manera automatizada gracias a los métodos desarrollados por la geodesia.

En la figura 35 podéis ver una imagen tridimensional de cómo puede ser la superficie irregular del geode.

Figura 35. El geode aproxima el nivel medio del mar con una superficie donde todos los puntos tienen gravedad constante.



Fuente: U. S. Geological Survey (USGS)

Recordad los conceptos de *latitud* y *longitud*, que estudiamos en el subapartado 1.2.1. de este módulo.

WGS84: acrónimo de *world geodetic system 1984* (sistema geodésico mundial).

Dirección recomendada

Podéis consultar el informe técnico de la NIMA con las características de WGS84 en el siguiente enlace:

http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/tr8350_2.html

Dirección recomendada

Si queréis ver más imágenes de geoides, podéis consultar las usadas en Norteamérica que proporciona la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos en el siguiente enlace: <http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/GEOID96/geo-indx.html>

Por las irregularidades que presenta el modelo de superficie definido por el geode, es imprescindible la obtención de una superficie de referencia con una definición matemática sencilla que permita realizar cálculos. La geodesia geométrica, otra rama de la geodesia, se ha encargado de conseguir una superficie de aproximación más adecuada para un tratamiento matemático: el elipsoide.

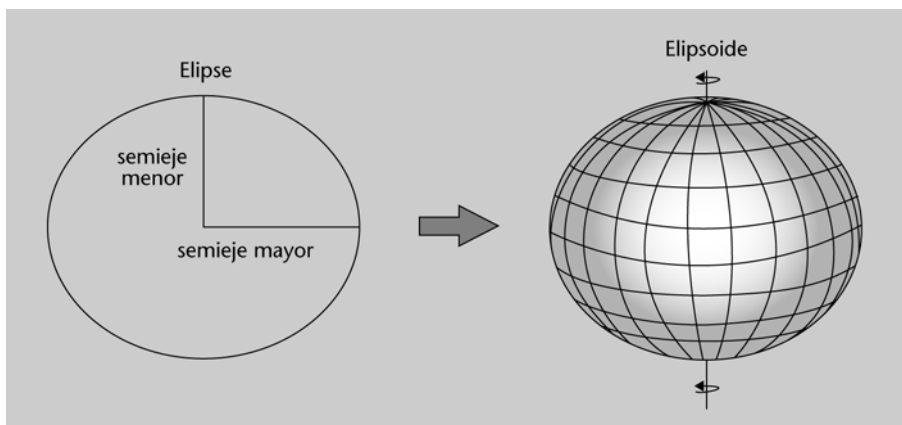
1.5.2. El elipsoide

El elipsoide es una figura tridimensional que se intenta adaptar al geode con la ventaja de que es independiente del material que forma la Tierra. Por lo tanto, es una superficie sin irregularidades que podemos modelizar con ecuaciones matemáticas.

El elipsoide es la superficie matemática simple que mejor se aproxima a la forma de la Tierra.

Tal como podéis ver en la figura 36, el elipsoide es una superficie de revolución que se obtiene a partir de la elipse cuando se rota sobre su eje menor. Tiene como parámetros principales la longitud de sus semiejes, que se llaman *semieje mayor* (radio ecuatorial) y *semieje menor* (radio polar).

Figura 36. Haciendo girar la elipse sobre su eje más corto obtenemos el elipsoide



Fuente: <http://recursos.gabrielortiz.com>

A partir de estos parámetros, podemos obtener otros valores de su geometría muy utilizados por cálculos geodésicos, como por ejemplo el aplanamiento o la excentricidad, que definimos a continuación:

- **Semieje mayor o ecuatorial (a):** longitud del semieje que va desde el centro de masas de la Tierra hasta la superficie terrestre.
- **Semieje menor o polar (b):** longitud del semieje que va desde el centro de masas de la Tierra hasta uno de los polos.

Modelos elipsoidales

Los modelos elipsoidales de la Tierra son necesarios para los cálculos precisos de rumbo sobre grandes distancias. Los receptores GPS, por ejemplo, usan modelos elipsoidales para calcular la posición y la información de los puntos de ruta.

- **Factor de aplanamiento (f):** indica el nivel de similitud con respecto a una esfera. Así, cuanto más se acerque su valor a cero, el elipsoide se parecerá más a una esfera. El factor de aplanamiento se define como:

$$f = 1 - \frac{b}{a}$$

Como los valores de f son muy pequeños, normalmente se utiliza $1/f$.

- **Excentricidad:** indica el grado de desviación de una órbita elíptica respecto de una órbita circular. Para una circunferencia la excentricidad es 0, para una elipse la excentricidad es mayor que 0 y menor que 1.

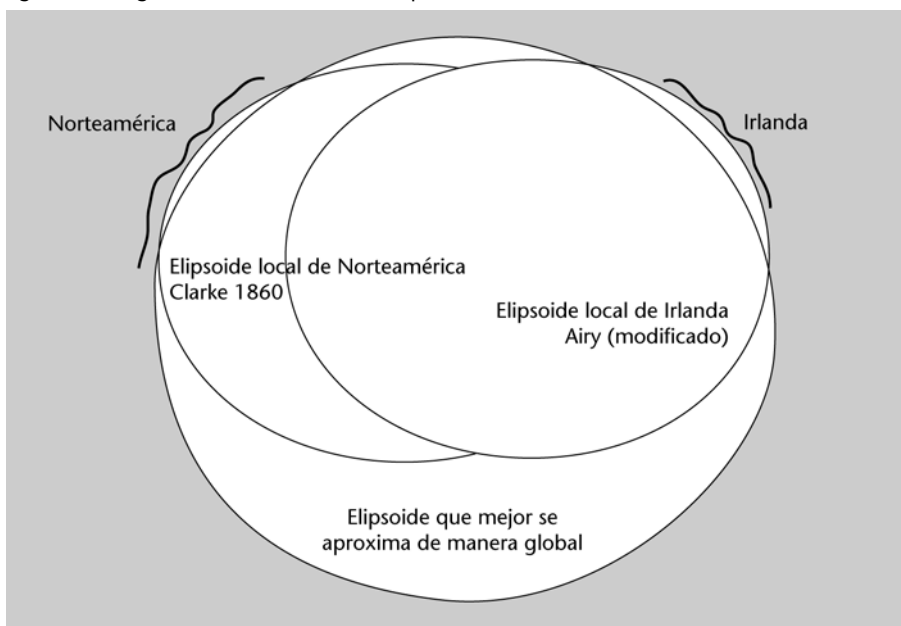
$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

La elección del elipsoide está más que justificada, tanto por razones de sencillez en su definición matemática como porque se ajusta al geoide en una aproximación de primer orden. En el subapartado 1.5.1 ya hemos visto las dificultades para medir una superficie global como el geoide y eso implica que tendremos dificultades similares para intentar ajustar un elipsoide global a este modelo de geoide global. Por este motivo se usan los **elipsoides locales**.

Un elipsoide local es una aproximación al geoide en una zona geográfica concreta. Se define de manera que se ajuste de la mejor manera posible a una zona específica de la Tierra. En la figura 37 podéis ver una sección imaginaria de la Tierra y cómo los elipsoides locales se aproximan mejor que los globales a los geoide de las zonas para las que han sido definidos. Por ejemplo, un elipsoide que se ajuste muy bien a un geoide global de toda la Tierra no ha de ser necesariamente el mejor para la zona de Norteamérica o de Irlanda.

Recordad que la aproximación de primer orden de una función matemática se define por un polinomio de primer grado.

Figura 37. Diagrama donde se muestran elipsoides locales



Actualmente hay una gran cantidad de elipsoides en uso y cada uno se corresponde con las características específicas de la zona para la cual se ha diseñado. Concretamente, los elipsoides de uso en la Península Ibérica y Cataluña son el Internacional de Hayford de 1924 y el *world geodetic datum* de 1984 (WGS84).

La existencia de múltiples elipsoides es un indicativo de que sólo son aproximaciones al geoide y que, por lo tanto, no representan con igual exactitud todos los puntos de la superficie terrestre. Podéis ver un listado de algunos elipsoides con sus parámetros en la tabla 1.

Tabla 1. Listado de algunos elipsoides de referencia con sus parámetros

Nombre	a	b	1/f
Australian National	6.378.160,0	6.356.774,719	298,25
Bessel 1841	6.377.397,155	6.356.078,963	299,152813
Clarke 1866	6.378.206,4	6.356.583,8	294,978698
Clarke 1880	6.378.249,145	6.356.514,87	293,465
Everest 1956	6.377.301,243	6.356.100,228	300,8017
Fischer 1968	6.378.150,0	6.356.768,337	298,3
GRS 1980	6.378.137,0	6.356.752,314	298,257222
International 1924 (Hayford)	6.378.388,0	6.356.911,946	297,0
SGS85	6.378.136,0	6.356.751,302	298,257
South American 1969	6.378.160,0	6.356.774,719	298,25
WGS72	6.378.135,0	6.356.750,52	298,26
WGS84	6.378.137,0	6.356.752,314	298,257224

Fuente: Peter H. Dana. Departamento de Geografía, Universidad de Texas en Austin.

Dirección recomendada

Para ver un listado de elipsoides de referencia, podéis consultar el siguiente enlace: <http://www.ncgia.ucsb.edu/education/curricula/giscc/units/u015/tables/table01.html>

1.5.3. Alturas ortométricas y elipsoidales

Según lo que hemos expuesto anteriormente, consideramos tres superficies de referencia geodésicas:

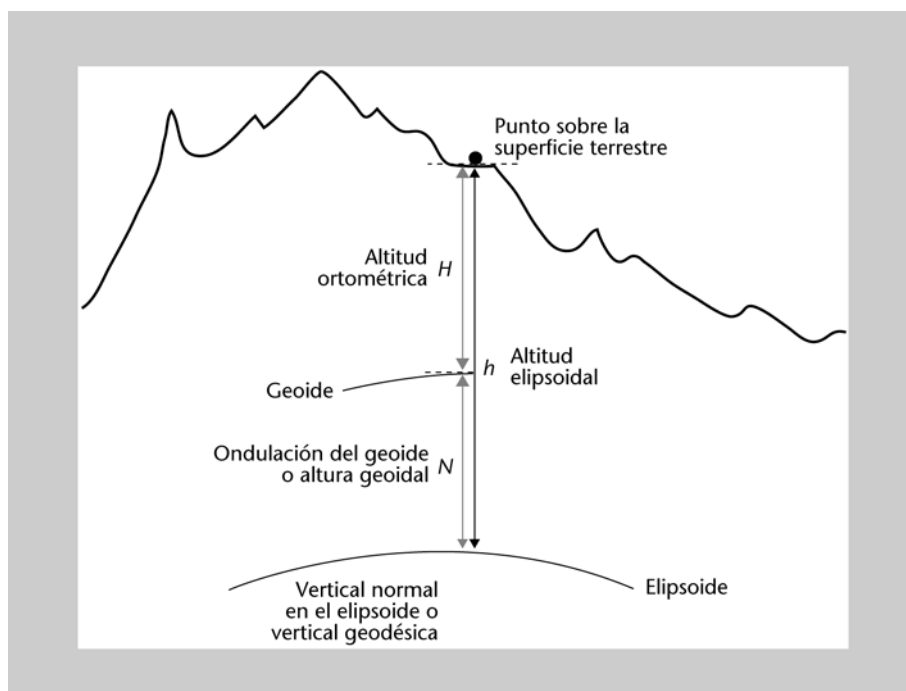
- La superficie de la Tierra (superficie topográfica)
- El geoide
- El elipsoide

En general, estas tres superficies no coinciden y podemos calcular tres valores de la altitud de un punto simple sobre la Tierra. Fijaos en la figura 38, donde se muestra la relación entre las tres superficies de referencia mencionadas que corresponde a tres tipos de altura (N , H , h):

- **Ondulación del geoide o altura geoidal (N):** es la distancia entre la superficie del geoide y la del elipsoide. Esta ondulación es muy importante para muchas operaciones cartográficas y geodésicas. Por ejemplo, el origen de las alturas que vemos en los mapas (curvas de nivel, cotas, etc.) se establece normalmente en el geoide. Concretamente, se establece en un punto del geoide, que en España es el nivel medio del mar en Alicante.

- **Altura ortométrica (H):** es la altura medida a partir del geoide. Esta distancia se mide a lo largo de la línea que va en la dirección de la gravedad en cualquier punto. Las alturas ortométricas se consideran alturas sobre el nivel medio del mar.
- **Altura elipsoidal (h):** es la distancia entre la superficie del elipsoide y la de la Tierra. Las alturas medidas a partir del elipsoide son las que nos dan las mediciones GPS. Estas alturas presentan diferencias notables con respecto a las ortométricas, a causa de la variación de la relación de distancia geoide-elipsoide a lo largo de toda la Tierra, y eso pasa con cualquier elipsoide considerado.

Figura 38. Relación entre las tres superficies de referencia y los tipos de altura de un punto sobre la Tierra



Fuente: <http://recursos.gabrielortiz.com>

La relación entre estas tres superficies se expresa matemáticamente con la ecuación 1:

$$h = H + N \quad (1)$$

donde:

h = altura sobre el elipsoide (elipsoidal)

H = altura sobre el geoide (ortométrica)

N = ondulación del geoide

Por lo tanto, vemos que la altura elipsoidal se calcula como la suma de la altura sobre el geoide más su ondulación.

Con la ecuación 1 podemos determinar fácilmente la altura ortométrica de un punto sobre la Tierra, si conocemos su altura elipsoidal y la ondulación del geoide en la misma posición.

Para ilustrar el uso de la ecuación que acabamos de ver, a continuación se muestran unos ejemplos detallados de cálculo de diferentes tipos de altura con distintas herramientas disponibles en línea. Estos ejemplos muestran la operación necesaria para todo usuario de GPS que recibe alturas elipsoidales y las tiene que transformar en ortométricas para mostrarlas sobre un mapa.

Ejemplo 1: Cálculo de altura elipsoidal sobre el elipsoide de Hayford

Enunciado:

Tenemos un punto $P = (\lambda, \varphi, H)$ sobre el geode UB91 con las siguientes coordenadas geodésicas:

- Longitud (λ) = $E 2^\circ 9' 25,7111''$ (donde ° son grados, ' son minutos, '' son segundos)
- Latitud (φ) = $N 41^\circ 22' 15,6587''$
- Altura ortométrica (H) = 63,509 m

Calcularemos su altura elipsoidal sobre el elipsoide internacional de Hayford de 1950 (ED50).

Solución:

Recordemos la ecuación 1, que nos relaciona los tres tipos de alturas:

$$h = H + N$$

De manera que para calcular la altura elipsoidal debemos conocer la ondulación del geode UB91 en el punto considerado.

Usaremos al modelo en línea de este geode, para calcular su ondulación sobre el elipsoide ED50: <http://www.icc.cat/web/content/php/geotex/alteliorto.php>.

Fijaos en la figura 39, donde se muestra la ondulación del geode seleccionado –en este caso el UB91 (geode local en Cataluña)– en el punto definido en coordenadas geodésicas. Para el punto concreto de nuestro ejemplo, tenemos que la ondulación del geode UB91 tiene un valor de $-18,672$ m y la altura ortométrica son 63,509 m.

Figura 39. Ejemplo de cálculo de la ondulación del geode UB91 para el punto dado

Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

Por lo tanto, según la ecuación 1, la altura sobre el elipsoide de Hayford es la siguiente:

$$h = 63,509 - 18,672 = 44,837 \text{ m}$$

También podríamos haber obtenido la altura elipsoidal a partir de lecturas directas realizadas con GPS de alta precisión sobre el punto.

Ejemplo 2: Cálculo de la ondulación del geode sobre WGS84

Enunciado:

Tenemos un punto $P = (\lambda, \varphi, H)$ sobre el geode EGM96 con las mismas coordenadas geodésicas que en el ejemplo 1.

Calcularemos la ondulación del geode en este punto sobre el elipsoide WGS84.

Recordad que las coordenadas geodésicas se estudian en el subapartado 1.2.1 de este módulo.

Dirección recomendada

UB91: acrónimo del geode local de Cataluña desarrollado por el ICC (Instituto Cartográfico de Cataluña).
Si queréis saber más:
http://www.icc.es/pdf/common/icc/publicacions_icc/publicacions_tecniques/geodesia/bienni_1997_1998/geode_ub91_tornat_visitar.pdf

Instituto Cartográfico de Cataluña:
<http://www.icc.cat>



Logotipo del Instituto Cartográfico de Cataluña

Solución:

Para obtener la ondulación del geode (altura geoidal), necesitamos un modelo del geode EGM96 que podemos encontrar en la siguiente dirección de Internet: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html> de la Agencia Geoespacial de los Estados Unidos (*National Geospatial Intelligence Agency*, NGA).

De la misma manera que hemos calculado la ondulación sobre el geode UB91 en el ejemplo anterior, ahora vamos a calcular la ondulación del geode EGM96 en el punto dado tal como muestra la figura 40. Esta figura nos muestra un **ejemplo de cálculo de la ondulación del geode EGM96 respecto del elipsoide WGS84 en el punto dado** en coordenadas geodésicas. En particular, encontramos que, en el modelo de geode que hemos consultado, la ondulación (*geoid height*, 'altura geoidal') es de 49,42 metros.

Lectura recomendada

EGM96: acrónimo del geode de precisión *earth gravity model 1996* (modelo de gravedad terrestre 1996).

Para saber más, consultad el artículo "EGM96.

Un nuevo modelo de geode de precisión" en el siguiente enlace:

http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=758

Figura 40. Ejemplo de cálculo de la ondulación del geode EGM96 para el punto dado

NGA EGM96 GEOID CALCULATOR		
	Latitude	Longitude
Degress	41	2
Minutes	22	9
Seconds	15.65870	25.71110
Geoid Height: 49.42 Meters		

Fuente: National Geospatial Agency (NGA) (<http://www.nga.mil/portal/site/nga01>)

Para verificar que el resultado es correcto, podemos hacer uso de la calculadora geodésica del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN) que encontraréis en el enlace http://www.ign.es/ign/es/IGN/calculadora_geodesica.jsp.



Logotipo del Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.es>)

1.6. Datum geodésico

Como ya hemos comentado en el subapartado anterior, la superficie del elipsoide intenta ajustarse lo máximo posible a la del geode. Y también hemos dicho que hay centenares de elipsoides, cada uno con sus propios parámetros. Entonces, nos podemos preguntar: ¿cómo podemos ubicar de forma tridimensional un elipsoide seleccionado con respecto al geode? ¿Cómo podemos situar el uno respecto al otro?

La definición de los parámetros (dimensiones, forma, posición) del elipsoide seleccionado y la determinación de un punto de tangencia común en las superficies del geode y del elipsoide nos permitirá fijar un punto en un espacio tridimensional. Eso es lo que se conoce como *datum geodésico*.

De una manera más formal, podemos decir que el datum es un conjunto de mediciones que definen la orientación de un elipsoide determinado en la superficie terrestre. Está formado por los siguientes elementos, que podéis ver representados en la figura 41:

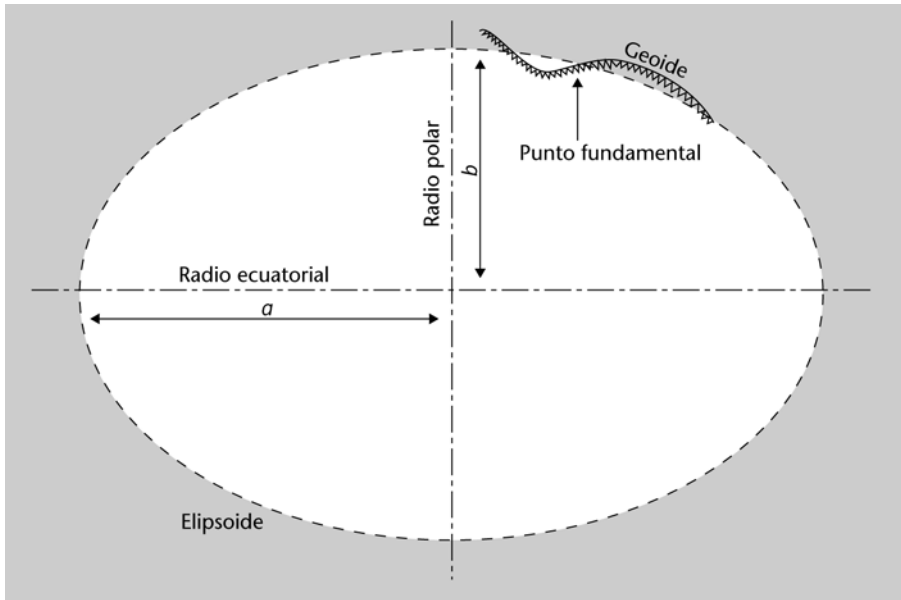
- La dimensión y forma del **elipsoide**, expresado como los valores de sus semiejes y el factor de aplanamiento.

Recordad que hemos estudiado el elipsoide en el subapartado 1.5.2.



- Un **punto fundamental**, en el que el geoide es tangente al elipsoide. De este punto se debe especificar la longitud, la latitud y el acimut de una dirección establecida.

Figura 41. Elementos que conforman un datum geodésico: el elipsoide y el punto fundamental



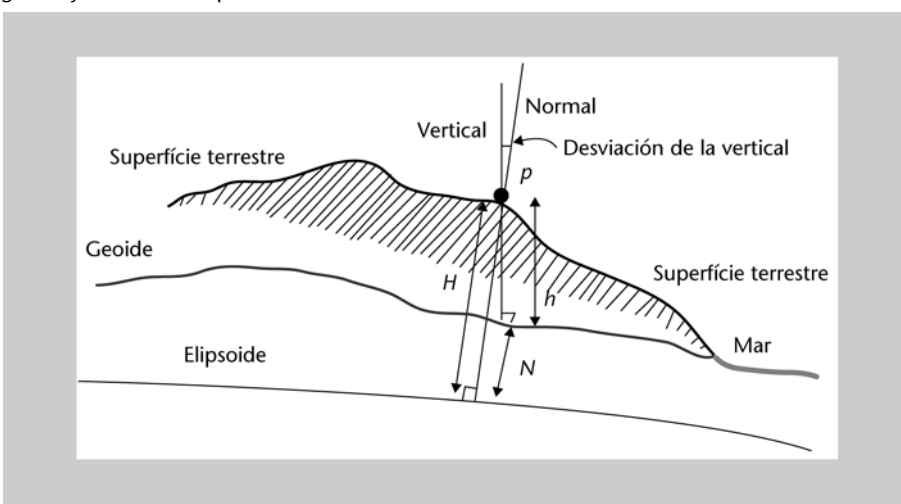
Fuente: U. S. Geological Survey (USGS)

En la figura 42 podéis ver las relaciones entre las tres superficies de referencia terrestres (geoide, elipsoide y la superficie terrestre), la dirección "normal" al elipsoide y la "vertical" (dirección de la gravedad) al geoide en un punto P. En el punto fundamental, la normal del elipsoide y la vertical del geoide coinciden, aunque a excepción de este punto normalmente no es así y esta diferencia se conoce como *desviación de la vertical*.

La distancia a lo largo de la normal al elipsoide es lo que se conoce como *altura elipsoidal* (h) y la distancia medida a lo largo de la vertical al geoide es lo que conocemos como *altura ortométrica* (H).

Recordad los diferentes tipos de alturas que ya vimos en el subapartado 1.5.3.

Figura 42. Relaciones entre las tres superficies de referencia terrestres y las direcciones vertical del geoide y normal del elipsoide



Fuente: Ordnance Survey Ireland (OSI)

Podemos decir, pues, que el datum es la superficie que se utiliza en el cálculo y determinación de coordenadas, donde se fijan unos datos iniciales de los cuales se deriva el resto.

El datum geodésico define las dimensiones y la forma de la Tierra, así como el origen y la orientación de los sistemas de coordenadas que se utilizan en cartografía.

En geodesia se utilizan dos tipos de datum, el vertical y el horizontal:

- El **datum vertical** es la superficie de referencia que permite el cálculo de alturas. Normalmente esta superficie es el geoide y las alturas serán ortométricas.

Recordad que las alturas ortométricas se han estudiado en el subapartado 1.5.3.

Ejemplos de datum vertical


Como ejemplos de datum vertical tenemos el *national geodetic vertical datum* de 1929 (NGVD29, datum vertical geodésico nacional), que se basa en mediciones sobre el nivel del mar, y el *north american vertical datum* de 1988 (NAV88, datum vertical norteamericano), que se basa en mediciones de la gravedad.

Fijaos en que en el nombre del datum siempre aparece el año en el que se definió.

- El **datum horizontal** define la relación entre la Tierra física y las coordenadas horizontales, de manera que nos permite la determinación de la latitud y la longitud. Se escoge un punto en el que las superficies del elipsoide de referencia y el geoide sean tangentes.

Ejemplo de datum horizontal

Como ejemplo de datum horizontal tenemos el *north american datum* de 1927 (NAD27, datum norteamericano) y el *european datum* 1950 (ED50, datum europeo).

En la geodesia española, el elipsoide que hasta julio del 2007 se utilizaba era el internacional de Hayford de 1924 y el datum europeo de 1950 o datum de Postdam (ya que está localizado en esta ciudad de Alemania, en la Torre Helmer). Este datum se conoce con el nombre de ED50 (*european datum* 1950). 

ED50

El ED50 o *european datum* 1950 (datum europeo de 1950) se basa en mediciones sobre el elipsoide internacional de 1924 (Hayford).

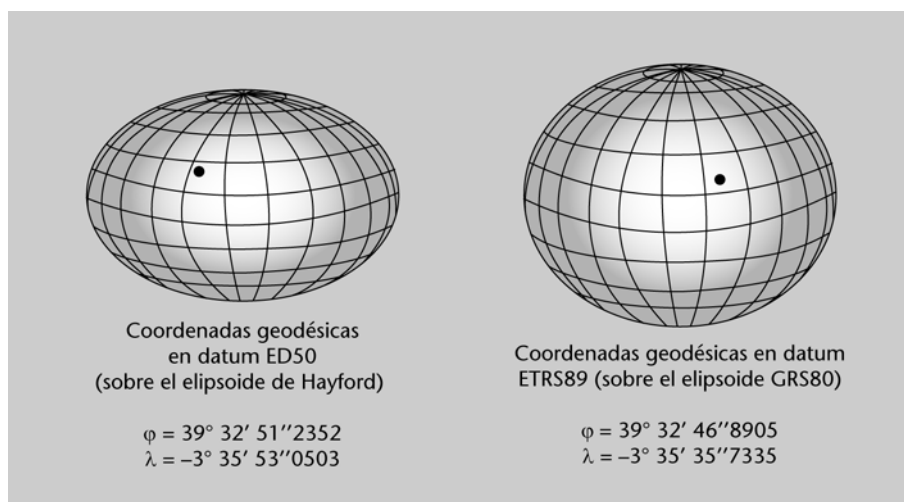
Actualmente, con la entrada en vigor del nuevo datum ETRS89 (*european terrestrial reference system* 1989, sistema de referencia terrestre europeo), la cartografía oficial se basa en el elipsoide GRS80 (*geodetic reference system* 1980, sistema de referencia geodésico).

La diversidad de datums de la que disponemos y los grandes avances tecnológicos que han hecho posible las mediciones de posiciones globales con precisión submétrica nos obligan a escoger el datum de nuestros datos con mucho cuidado, y a hacer transformaciones muy cuidadosas entre las coordenadas

definidas en diferentes datums. Cabe recordar que es muy importante indicar el datum en el que se expresan las coordenadas con las que se define una determinada cartografía, ya que la posición de un lugar sobre la superficie terrestre depende del datum seleccionado.

Para ilustrar la importancia de la selección del datum en la determinación de las coordenadas de un punto, fijaos en la figura 43. Podéis ver un mismo punto situado sobre los elipsoides correspondientes a dos datums diferentes. En cada caso, el punto tendrá unas coordenadas geodésicas diferentes.

Figura 43. Un mismo punto tiene coordenadas geodésicas diferentes según el datum considerado



Fuente: imagen adaptada de <http://recursos.gabriel.ortiz>

La diferencia en la localización entre dos datums puede llegar a ser de decenas o centenares de metros. Hay que tener en cuenta que los sistemas de posicionamiento global (GPS, *global positioning system*) utilizan el datum WGS84, mientras que, por ejemplo, en España se utiliza el ED50. Con la implantación del nuevo datum ETRS89 este problema se resolverá, ya que este datum es prácticamente equivalente al WGS84.

Conocer el datum de referencia de las coordenadas es un parámetro fundamental para mantener la exactitud geográfica.

1.7. Redes geodésicas

Hemos visto que el datum define un punto fundamental donde la normal al geoide coincide con la normal al elipsoide. Este punto debe materializarse sobre el terreno para que sea el origen por donde empezar a medir o determinar una posición. Éste es precisamente el objetivo de las redes geodésicas.

La figura 44 muestra la representación artística de una red de vértices mundial que establece una referencia terrestre global para el cálculo de posiciones.

Dirección recomendada

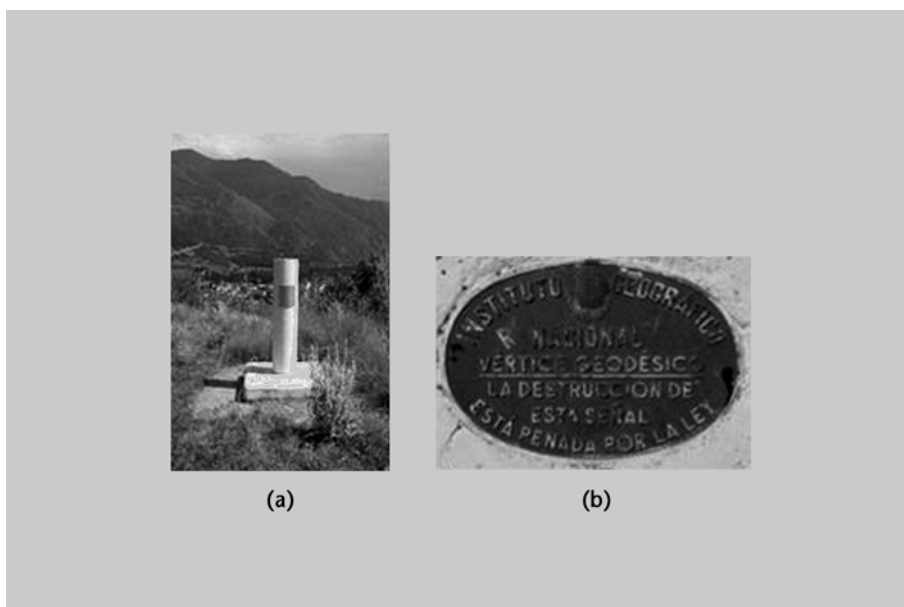
Para ver otros ejemplos de cómo afecta la selección del datum a las coordenadas obtenidas, consultad el siguiente enlace: <http://www.ncgia.ucsb.edu/education/curricula/giscc/units/u015/figures/figure08.gif>

Las **redes geodésicas** están formadas por un conjunto de puntos del territorio, llamados **vértices geodésicos**, de los que se ha medido el emplazamiento con gran precisión y que se materializan sobre el terreno con hitos o señales.

Ejemplo de vértice geodésico

En la figura 45 podéis ver la foto de un vértice geodésico de una red geodésica del IGN. Los vértices del IGN se materializan en el territorio en un cilindro vertical blanco de 120 cm de altura por 30 cm de diámetro sobre un prisma de hormigón (figura 45a) con la placa del IGN (figura 45b). En la parte superior del cilindro se ubica un punto al que se refieren las coordenadas del vértice y donde se sitúan los instrumentos topográficos para realizar las mediciones.

Figura 45. Vértice geodésico



a. Vértice geodésico de una red geodésica del IGN. b. Placa del IGN que identifica el vértice.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional de España (IGN)

El diseño de estas redes se hace en función de las características del terreno y pueden observarse con métodos geodésicos o con métodos topográficos, según el nivel de precisión que se quiera alcanzar.

Para determinar las coordenadas de los vértices geodésicos, se empieza a partir del punto fundamental del datum sobre el que se trabaja (como vimos en el subapartado anterior). El resto de puntos se determinan por **triangulación** con observaciones de nivelación o de satélite.

Los vértices geodésicos se catalogan en categorías de primer, segundo y tercer orden. La red de primer orden tiene los vértices separados unos 40 km, la de segundo orden los tiene separados unos 20 km y la de tercer orden entre 4 y 5 km. Aunque la red de primer orden es la que tiene los vértices más espaciados, tiene los vértices calculados con mayor precisión que los de las otras redes.

Figura 44. El objetivo principal de las redes geodésicas es el de proporcionar las coordenadas y velocidades de sus vértices.



Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Triangulación

En geodesia, la triangulación es el método que nos permite conocer nuestra posición si conocemos las distancias a tres puntos de coordenadas conocidas. Ésta es la base fundamental del sistema GPS.

Las redes geodésicas consisten, básicamente, en una serie de puntos distribuidos por el territorio que forman una malla de triángulos de los que conocemos las coordenadas de los vértices, que llamamos *vértices geodésicos*.

Además de las redes de primer, segundo y tercer orden mencionadas anteriormente, hay redes de menor orden obtenidas por densificación de los vértices geodésicos de redes de orden superior. Un ejemplo de este tipo de red es la red geodésica utilitaria de Cataluña.

La disponibilidad de una red geodésica utilitaria en el ámbito territorial de Cataluña, basada en las redes estatales, que al mismo tiempo se basan en redes continentales, es un elemento primordial para dar alta precisión a la cartografía. Tened en cuenta que sobre la cartografía se proyectan las distintas actividades que se desarrollan sobre el territorio, como son las obras públicas o la planificación a cualquier nivel, entre otras (Ley 11/1994 sobre las señales geodésicas, de 11 de julio de 1994).

La red utilitaria (RU) de Cataluña es una red de cuarto orden medida con GPS, resultado de la densificación de las redes de orden superior.

La red geodésica utilitaria de Cataluña es una red tridimensional, en la que no se separan los componentes horizontales de los verticales. Las coordenadas de sus vértices se determinan mediante cálculos globales que abarcan todo el territorio de Cataluña y que integran datos de soporte para la conexión con las redes estatales y nuevas observaciones para la determinación efectiva de los vértices de la red utilitaria.

La distribución de vértices de la red geodésica utilitaria varía entre unos 800 metros en las áreas urbanas con gran densidad de edificación, donde el uso posterior de satélites para trabajos topográficos es difícil, y unos 10 kilómetros en las áreas montañosas, donde el uso de satélites permite la determinación de coordenadas con gran precisión y rapidez y a un bajo coste.

Los vértices de la red utilitaria se emplazan en lugares de acceso fácil, con la única condición de evitar las obstrucciones en la recepción de las señales de los satélites geodésicos. Sin embargo, para permitir el aprovechamiento de la red con técnicas topográficas clásicas, en la medida de lo posible y especialmente en las áreas urbanas, los vértices de la red utilitaria se distribuyen de manera que se mantenga la visibilidad con al menos dos de los vértices vecinos.

Podemos identificar fácilmente las señales geodésicas en la cartografía del ICC, donde se distinguen por un símbolo (ved la figura 46) que indica el

Dirección recomendada

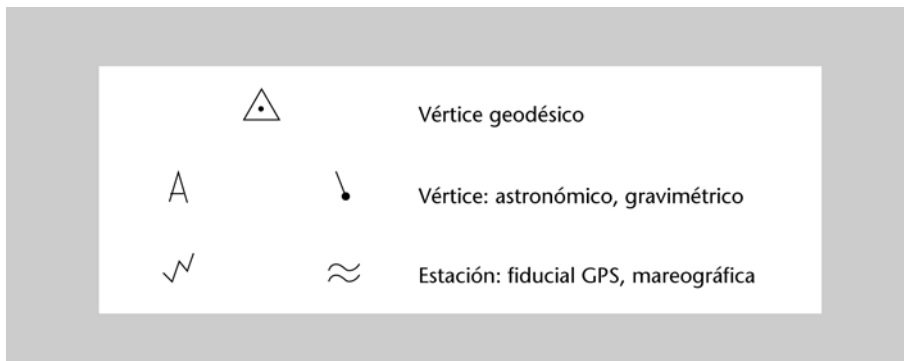
Podéis consultar el texto completo de la Ley 11/1994, de 11 de julio, sobre las señales geodésicas en el siguiente documento PDF: http://www.icc.es/web/content/pdf/ca/prof/geodesia/xu/Llei_11_1994_senyals_geodesics.pdf

Red utilitaria

La RU es una red tridimensional ya que la determinación de sus vértices se realiza con observaciones GPS, que son tridimensionales. El conocimiento preciso del geode, junto con las observaciones GPS, nos permiten integrar los componentes horizontales con las altitudes mediante la información del campo gravitatorio contenida en el geode.

tipo de red al que pertenecen y un código numérico identificativo de nueve dígitos.

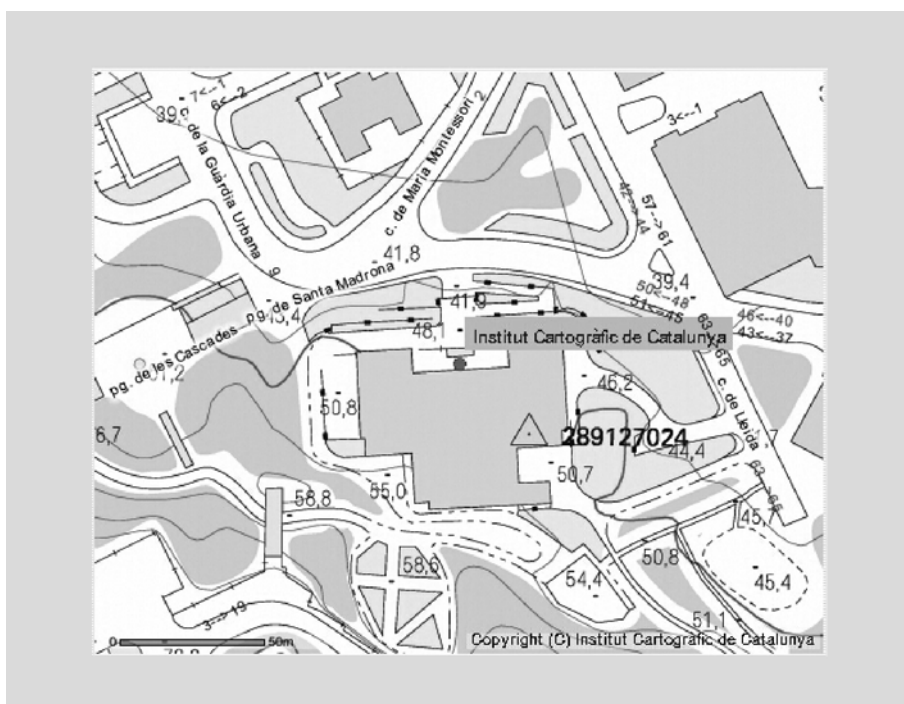
Figura 46. Símbolos de los diferentes tipos de señales geodésicas que podemos encontrar en la cartografía del ICC



Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) (<http://www.icc.cat>)

En la figura 47 podéis ver un detalle del mapa topográfico de Cataluña 1:5.000, donde se muestra un vértice geodésico, concretamente el vértice que está situado en el edificio del ICC, con el código 289127024 que lo identifica.

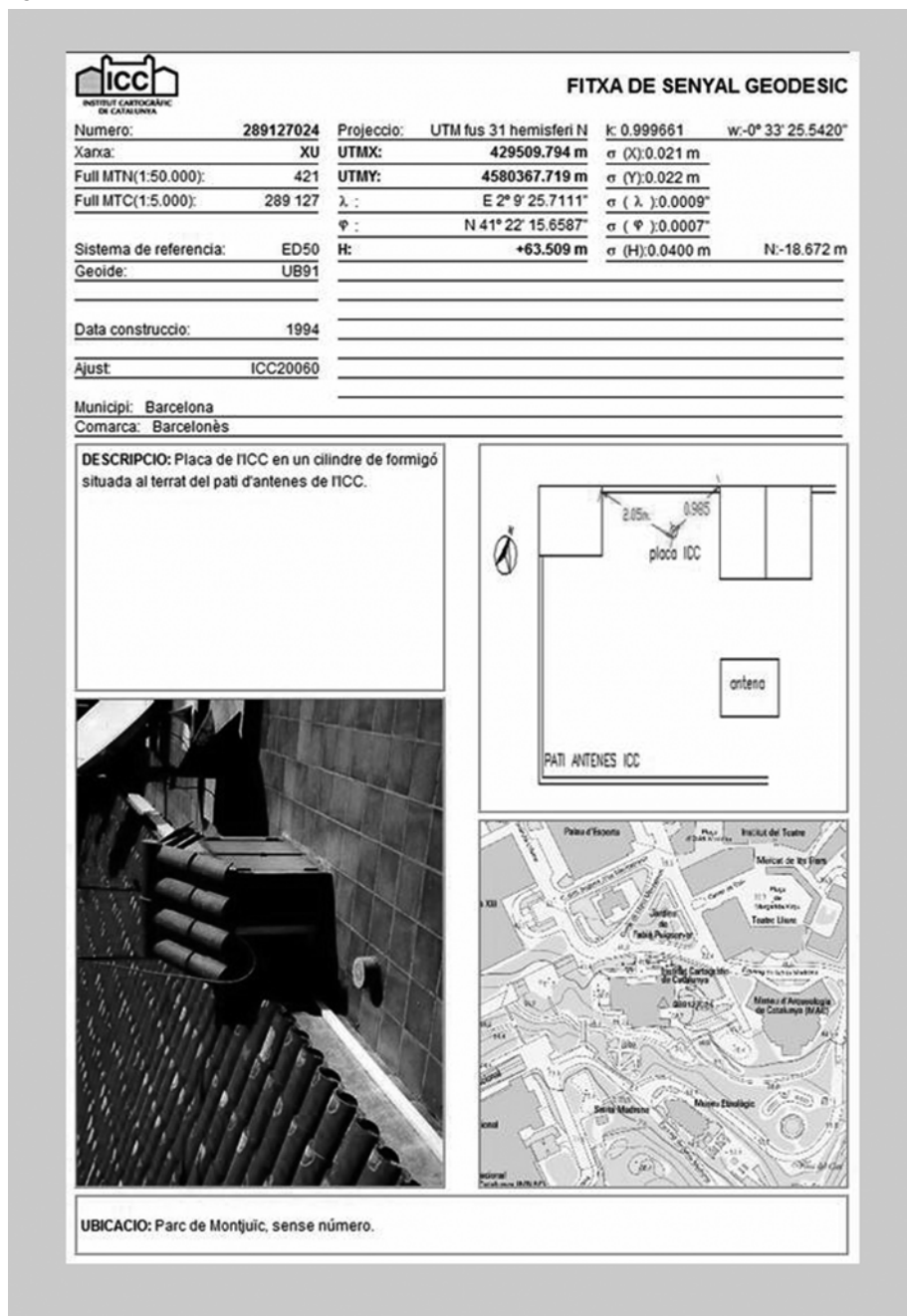
Figura 47. Detalle del mapa topográfico de Cataluña 1:5.000 editado por el ICC donde se muestra un vértice geodésico



Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

Para poder conocer la descripción, ubicación, coordenadas y otra información relacionada con las señales geodésicas se genera una **reseña** de la señal. Una reseña de señal geodésica es una ficha descriptiva de la señal. Fijaos en la figura 48, que nos muestra la reseña del vértice geodésico 289127024 que hemos mostrado anteriormente en la figura 47.

Figura 48. Reseña del vértice 289127024 de la RU ubicado en el edificio del ICC



Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

En particular, las reseñas de los vértices de la RU se pueden consultar e imprimir en la base de reseñas de la red utilitaria de Cataluña en el siguiente enlace: http://galileo.icc.es/website/icc_ressenyes/viewer.htm.

En el ejemplo de la figura 48 podéis ver la información que se muestra en las reseñas: el código numérico identificativo del vértice, la red a la que pertenece, el término municipal donde se ubica, el sistema de referencia utilizado para el cálculo de las coordenadas y la proyección en la que se representan estas coordenadas. También se especifican las coordenadas del vértice expresadas tanto en la proyección UTM como en coordenadas geográficas. Además, podemos ver un croquis donde se detalla gráficamente la localización precisa de la señal geodésica, una foto de su emplazamiento, así como un detalle del mapa topo-

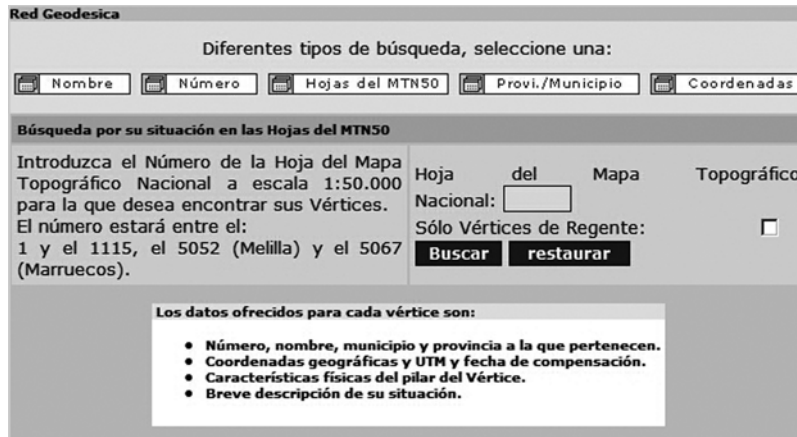
Dirección recomendada

Para consultar una descripción exhaustiva de las fichas de las señales geodésicas (reseñas) del ICC, visitad el siguiente enlace: http://www.icc.cat/web/content/ca/prof/geodesia/xu_interpretacio_fitxes.html

gráfico 1:5.000 en torno al punto. Finalmente, se proporciona una breve descripción del recorrido que debe hacerse para llegar allí.

Acabamos de ver cómo pueden consultarse los vértices geodésicos que nos proporciona el ICC, pero tened presente que no es la única manera. Por ejemplo, en la figura 49 se muestra una de las opciones de la herramienta de consulta de las bases de vértices geodésicos del IGN (Instituto Geográfico Nacional). Podéis acceder a él utilizando el siguiente enlace: http://www.ign.es/ign/es/IGN/vertices_geodesicos.jsp.

Figura 49. Hoja de búsqueda de vértices geodésicos proporcionada por el IGN



Fuente: Instituto Geográfico Nacional de España (IGN)

La web de la Unidad Municipal de Análisis Territorial (UMAT) que gestiona el Sistema de Información Territorial del Ayuntamiento de Gerona nos proporciona otro ejemplo de herramienta de consulta de vértices geodésicos, en este caso sobre una red local. Consultad el enlace <http://www.ajuntament.gi/umat/geodesia/ressenyas>.

1.8. Sistemas de referencia y marcos de referencia geodésicos

Acabamos de ver que las redes geodésicas constituyen la expresión física sobre el terreno de unos puntos de referencia para realizar medidas y observaciones. Esta referencia para el cálculo de coordenadas es lo que se llama **sistema de referencia geodésico** y su materialización se conoce con el nombre de **marco de referencia**.

Un **sistema de referencia geodésico** es el conjunto de parámetros que definen un sistema de coordenadas junto con una serie de constantes físicas que permitan describir completamente el modelo funcional de las observaciones. Este conjunto de parámetros y de constantes físicas es lo que conocemos como *datum*.

La materialización sobre el terreno de un sistema de referencia (*datum*), mediante vértices geodésicos con coordenadas en el correspondiente sistema de referencia, es lo que se llama **marco de referencia**.

Recordad que estudiamos los sistemas de coordenadas en el subapartado 1.2 de este módulo. También estudiamos el concepto de *datum* en el subapartado 1.6.

Recordad que estudiamos los vértices geodésicos en el subapartado 1.7 de este módulo.

En España, desde el 27 de julio del 2007 se adopta el sistema europeo ETRS89 (*european terrestrial reference system* 1989, sistema de referencia terrestre europeo) como el sistema de referencia geodésico oficial para la georreferenciación geográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las islas Baleares. Este sistema es una realización del *international terrestrial reference frame* (ITRF, marco de referencia terrestre internacional) y tiene asociado el elipsoide GRS80 (*geodetic reference system* 1980, sistema de referencia geodésico).

Este nuevo datum oficial es el que utiliza la mayoría de los países europeos y su principal ventaja es que no es necesario realizar transformaciones desde los datos capturados por un GPS, ya que es prácticamente equivalente al datum internacional WGS84.

WGS84 y ETRS89 son equivalentes para la gran mayoría de las aplicaciones topográficas o cartográficas. El primero está basado en el elipsoide del mismo nombre, WGS84, mientras que el segundo lo está sobre el SGR 80, que adoptó la Asociación Internacional de Geodesia en 1979. Ambos elipsoides son idénticos excepto en la excentricidad, en la cual difieren ligeramente.

ETRS89 es el sistema de referencia geocéntrico oficial en Europa, de precisión mucho más elevada que la última solución WGS84.

Antes de la adopción de este nuevo sistema de referencia, había que trabajar con diferentes sistemas. El antiguo sistema de referencia oficial era el *european datum* 1950 (ED50, datum europeo 1950), como ya apuntamos en el subapartado 1.6. Las altitudes utilizadas en ED50 son altitudes ortométricas referidas al nivel medio del mar en Alicante. Este sistema se materializa sobre el territorio en los 12.000 puntos que forman la Red Geodésica Nacional Convencional o Red de Orden Inferior (ROI, Red de Orden Inferior).

Por otra parte, el sistema de referencia utilizado por la tecnología GPS es el WGS84. Este sistema está bajo responsabilidad de la National Imagery Agency (NIMA). El marco de referencia lo establecen el conjunto de estaciones del segmento de control del sistema GPS y de algunas estaciones de la misma NIMA.

El hecho de tener que trabajar con diferentes sistemas de referencia y la necesidad de definir sistemas de referencia con mayor precisión que los actuales, de manera que sean coherentes con las nuevas tecnologías de observación y medida, ha sido la causa de la implantación de un nuevo sistema de referencia global de ámbito europeo como es el ETRS89. El IGN es el organismo encargado de la creación, cálculo y mantenimiento de la red geodésica nacional de España, que, a partir de diferentes campañas de observación realizadas en diferentes años y con diferentes metodologías, está formada por:

- red geodésica nacional convencional o red de orden inferior (ROI),
- IBERIA95,
- Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE).

Dirección recomendada

Podéis consultar el texto completo del Real decreto 1071/2007, de 27 de julio del 2007, que regula el sistema de referencia geodésico oficial en la Península Ibérica en el siguiente documento: <http://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35986-35989.pdf>.

Recordad que estudiamos las altitudes ortométricas en el subapartado 1.5.3. de este módulo.

IBERIA95 y REGENTE es la materialización del ETRS89 en España, que en particular en Cataluña se materializa sobre el territorio con la red geodésica utilitaria de Cataluña. El Instituto Cartográfico de Cataluña es el organismo responsable de su construcción y observación, y de determinar y distribuir las coordenadas oficiales de sus vértices.

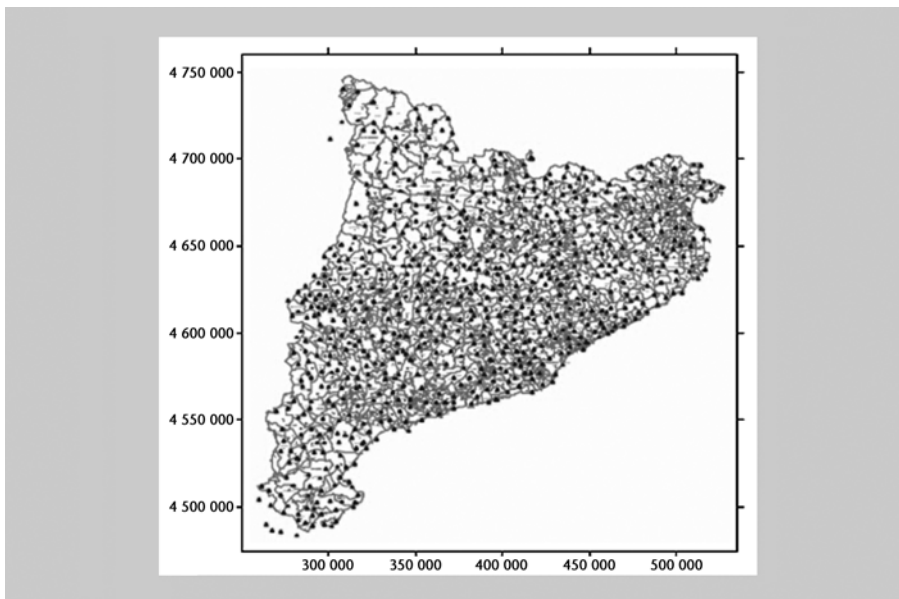
Recordad que estudiamos la red geodésica utilitaria de Cataluña en el subapartado 1.7 de este módulo.

A continuación describiremos brevemente a cada uno de estos marcos de referencia:

- **ROI** consta aproximadamente de 12.000 vértices referidos al sistema de referencia ED50. La red cubre la totalidad del territorio nacional mediante una malla regular de triángulos. Las distancias máximas de sus lados están entre los 3 y los 12 kilómetros. Fue creada mediante métodos clásicos de observación de manera que se requiere la visibilidad entre los vértices. La calidad de esta red está entre los 10 y los 30 cm.

Actualmente, el IGN está reprocesando la ROI dentro del marco de referencia ETRS89 con las observaciones GPS que, mediante convenios, le facilitan las diferentes comunidades autónomas. En Cataluña este marco de referencia, como se puede ver en la figura 50, se materializa en 732 vértices geodésicos distribuidos uniformemente por el territorio.

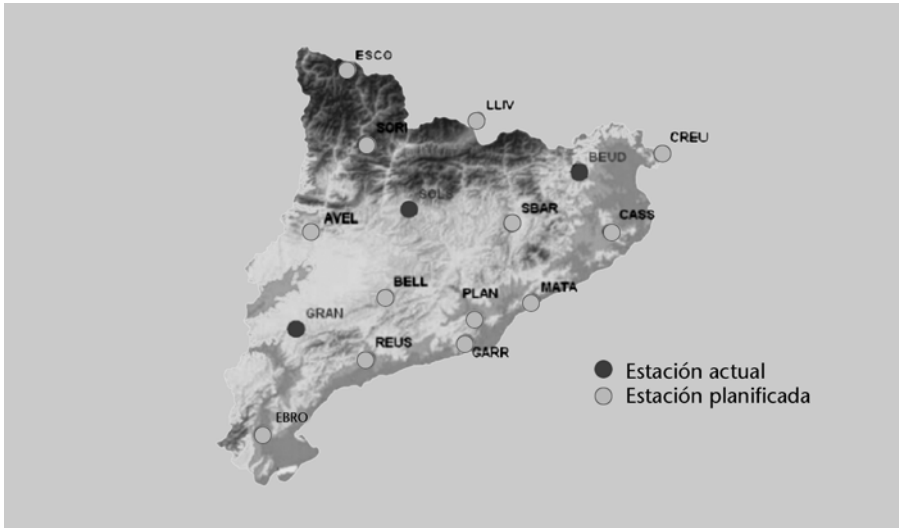
Figura 50. ROI en Cataluña, 732 vértices



Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

- **IBERIA95** es una red geodésica tridimensional que se compone de 39 vértices (27 españoles y 12 portugueses) que densifican el marco de referencia ETRS89 en la Península Ibérica.
- **REGENTE** consta de 1.200 vértices referidos al sistema de referencia ETRS89. Se trata de la densificación en el territorio español de la red IBERIA95. El objetivo de esta red es la obtención de una red geodésica tridimensional de primer orden con una precisión igual o superior a 5 cm. En la figura 51 podéis ver la distribución de las estaciones de esta red en el territorio de Cataluña.

Figura 51. Marco ETRS89 en Cataluña



Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

Los vértices de REGENTE también pertenecen a la antigua ROI; de esta manera se dispone de las coordenadas de los puntos en los sistemas ETRS89 y ED50.

Esta red cubre todo el territorio nacional, de manera que en cada hoja del mapa topográfico nacional E 1:50.000 (MTN50) hay como mínimo un vértice REGENTE.

1.9. Cálculo de transformaciones entre sistemas de referencia

Hasta ahora hemos descrito qué son los sistemas de referencia, cuáles son los sistemas utilizados en la Península Ibérica y cuáles son sus características. También hemos visto que el nuevo sistema de referencia ETRS89 resuelve el problema de tener que trabajar con diferentes sistemas de referencia. Sin embargo, será necesario realizar transformaciones entre sistemas de referencia para compatibilizar los datos existentes con los datos en el nuevo datum ETRS89. Entonces, si tenemos un punto expresado en un sistema de referencia y lo queremos expresar en otro, ¿cuál es el proceso que hay que seguir para realizar esta transformación? ¿Hay herramientas que nos ayuden a realizar esta tarea? ¿Cuáles son?

Este subapartado resuelve esas cuestiones. Primero se describirán diferentes métodos que conforman la base teórica para realizar esta transformación para a continuación mostrar algunas de las herramientas de las que disponemos para la realización de la transformación de coordenadas entre diferentes sistemas de referencia.

1.9.1. Transformaciones de datum

Para expresar las coordenadas dadas en un datum origen en un datum destino, como por ejemplo obtener los valores de longitud y latitud en el datum ED50 a partir de los valores de longitud y latitud obtenidos con GPS expresados en

Direcciones recomendadas

Podéis consultar la distribución de hojas de la MTN50 en las siguientes direcciones: <http://www.cnig.com/muestraProductos/mtn/grafico/Índice%201-50.000.png>

http://www.uam.es/docencia/geoteca/MTN/MTN50mil_GEOteca-.pdf

También podéis visualizar la MTN50 hoja a hoja en el enlace http://www.ign.es/ign/es/IGN/cartoteca_MapTopo.jsp seleccionando la opción MTN50-MTN25.

el datum WGS84, es necesario aplicar transformaciones numéricas a las coordenadas.

Recordad que todo datum (ved el subapartado 1.8) tiene un elipsoide de referencia asociado, fijado y orientado a la superficie de la Tierra; entonces ese tipo de transformación consiste en reposicionar el elipsoide de referencia asociado (trasladar su centro) y a reorientarlo (rotar sus ejes). Además, se puede realizar un reescalado, dado que los elipsoides pueden tener diferente dimensión.

Las transformaciones de datum son esencialmente conversiones entre dos sistemas de coordenadas, definidos sobre elipsoides con localizaciones diferentes y posiblemente diferentes parámetros, es decir, con diferentes forma y dimensiones.

Los métodos de transformación de datum más comunes son el de **Molodenski** y el de **Bursa-Wolf**. A continuación los describimos.

Método de transformación de Molodenski

La transformación de Molodenski es una transformación de baja precisión que sólo utiliza tres parámetros aplicados sobre coordenadas geográficas. Iguala los centros de los dos elipsoides a partir de los valores de desplazamiento en cada uno de los ejes (Δx , Δy , Δz) y su precisión está en torno a los 8 ó 10 metros.

Esta transformación se basa en el supuesto, generalmente erróneo, de que los ejes de los dos elipsoides son paralelos. Aun así, para trabajos localizados en una determinada región, el error que se introduce con este supuesto normalmente es menor que la precisión de los datos observados. De todos modos, la precisión obtenida con este método es bastante baja, sobre todo si se aplica sobre grandes extensiones.

En caso de querer aplicar esta translación del origen del elipsoide de referencia directamente sobre coordenadas geocéntricas (ved el subapartado 1.2.2), obtenemos la sencilla transformación que se conoce con el nombre de **translación geocéntrica** y que se representa matemáticamente mediante la ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

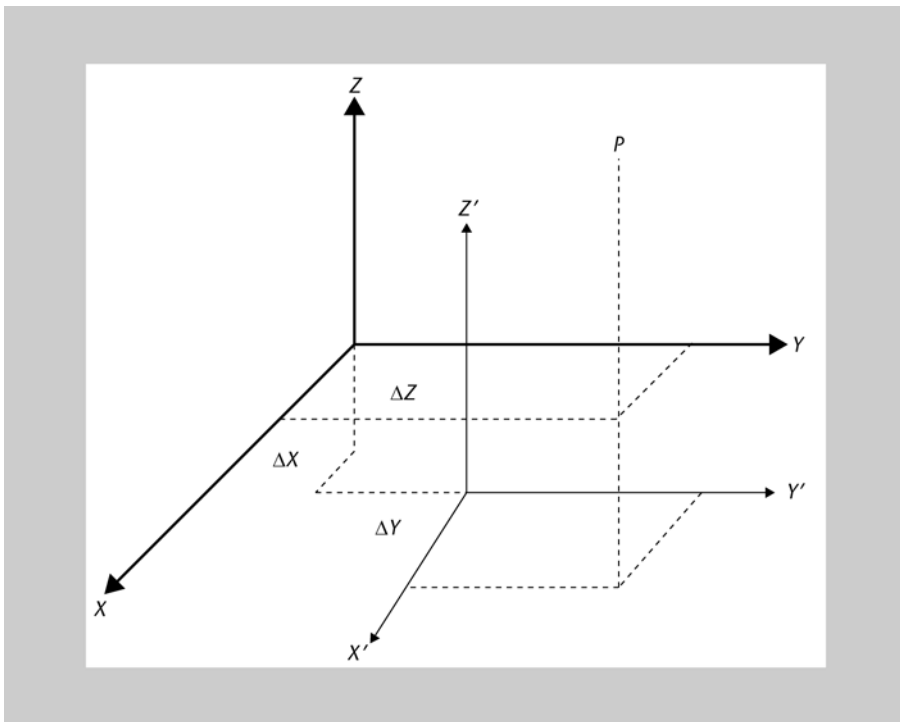
- X, Y, Z son las coordenadas geocéntricas en datum origen,
- X', Y', Z' son las coordenadas geocéntricas en datum destino,
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ son los términos de translación de cada uno de los ejes.

Dirección recomendada

Para consultar tablas de parámetros de transformación de datum respecto a WGS84, y con diferentes métodos de transformación, os recomendamos que consultéis el enlace <http://www.aec2000.eu/geodesy/geodesy.htm>

En la figura 52 podéis ver representados los parámetros de transformación de una translación geocéntrica.

Figura 52. Representación de los parámetros para la transformación geocéntrica



Fuente: <http://www.cartesia.org>

En caso de tener coordenadas geográficas, habría que transformarlas primero a coordenadas geocéntricas para poder aplicar el método de translación geocéntrica y, finalmente, el resultado volver a transformarlo a coordenadas geográficas.

En vez de realizar todas estas transformaciones entre sistemas de coordenadas geocéntrico y geográfico podemos utilizar el método de Molodenski, que expresa el método de translación geocéntrica directamente sobre coordenadas geográficas.

Podéis ver la expresión matemática de la **transformación estándar de Molodenski** en la ecuación 3, en la que obtenemos $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ (variación de φ y λ). No os asustéis por la fórmula. Es muy larga, pero normalmente no se utiliza, ya que existen bastantes herramientas que automatizan los cálculos. Eso sí, es importante saber cuál es la complejidad que hay detrás para ser conscientes de que las transformaciones que hacemos no son triviales.

$$(M+h)\Delta\varphi = -\sin\varphi\cos\lambda\Delta X - \sin\varphi\sin\lambda\Delta Y + \cos\varphi\Delta Z + \frac{e^2\sin\varphi\cos\varphi}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{\frac{1}{2}}}\Delta a$$

$$+ \sin\varphi\cos\varphi\left(M\cdot\frac{a}{b} + N\cdot\frac{b}{a}\right)\Delta f$$

$$(N+h)\cos\varphi\Delta\lambda = -\sin\lambda\Delta X + \cos\lambda\Delta Y \quad (3)$$

$$\Delta h = \cos\varphi\cos\lambda\Delta X + \cos\varphi\sin\lambda\Delta Y + \sin\varphi\Delta Z - (1-e^2\sin^2\varphi)^{\frac{1}{2}}\Delta a$$

$$+ \frac{a\cdot(1-f)}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{\frac{1}{2}}}\cdot\sin^2\varphi\Delta f$$

Donde:

h es la altura elipsoidal (en metros),
 φ es la latitud del punto a transformar,
 λ es la longitud del punto a transformar,
 a es el semieje mayor del elipsoide (en metros),
 b es el semieje menor del elipsoide (en metros),
 f es el aplanamiento del elipsoide (*flattening*)
 e es la excentricidad del elipsoide.

En su formulación, Molodenski también utiliza las diferencias entre los dos semiejes mayores (Δa) y las diferencias de aplanamiento (Δf) de los dos elipsoides de referencia. Estos valores se pueden calcular fácilmente a partir de los parámetros de los elipsoides.

Finalmente, en la ecuación 3 también se utilizan los valores M y N para una latitud dada y con respecto al elipsoide del datum de inicio, donde:

- M es el radio de curvatura del meridiano de latitud φ , y se expresa de la siguiente manera:

$$M = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

- N es el radio de curvatura de la perpendicular al meridiano de latitud φ , y se expresa de la siguiente manera:

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Hay una versión simplificada de las ecuaciones de la transformación de Molodenski que se llama **método de Abridged Molodenski** y que se expresa matemáticamente con las siguientes ecuaciones:

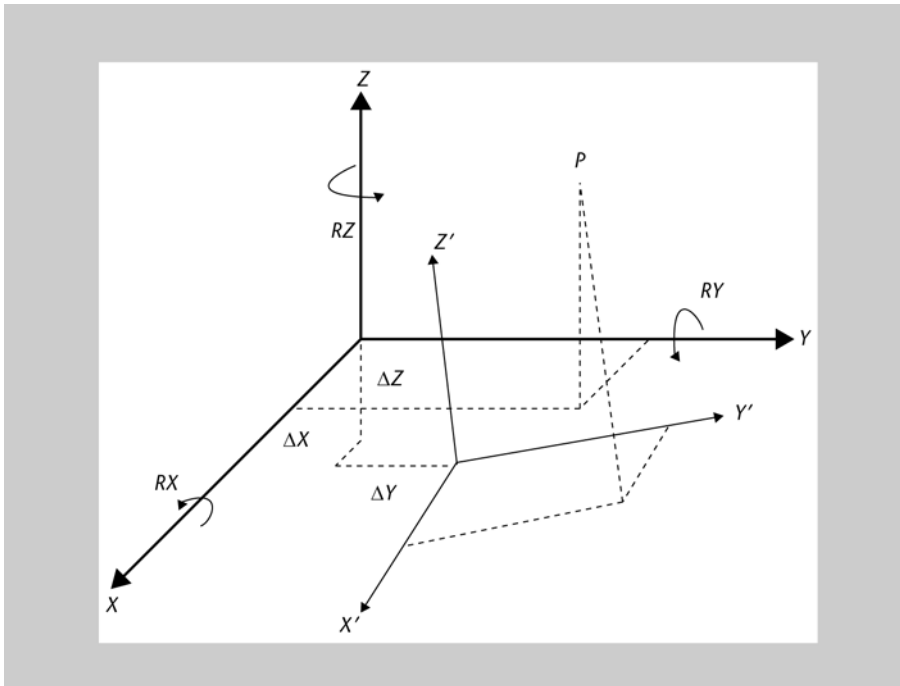
$$\begin{aligned} M\Delta\varphi &= -\sin\varphi \cos\lambda\Delta X - \sin\varphi \sin\lambda\Delta Y + \cos\varphi\Delta Z \\ &\quad + (a\Delta f + f\Delta a) \cdot 2\sin\varphi \cos\varphi \\ N \cos\varphi\Delta\lambda &= -\sin\lambda\Delta X + \cos\lambda\Delta Y \\ \Delta h &= \cos\varphi \cos\lambda\Delta X + \cos\varphi \sin\lambda\Delta Y + \sin\varphi\Delta Z \\ &\quad + (a\Delta f + f\Delta a) \sin^2\varphi - \Delta a \end{aligned} \quad (6)$$

Donde los parámetros representan los mismos conceptos que en la ecuación 3.

Para acabar este subapartado, sólo resta comentar que, aunque decimos que el método de Molodenski es de tres parámetros, en los archivos de parámetros de las transformaciones de datum se suelen dar cinco parámetros: Δx , Δy , Δz , Δa y Δf . Aunque Δa y Δf se pueden calcular fácilmente a partir de los parámetros de los elipsoides, ya que corresponden a la diferencia de semiejes mayores y a la diferencia de *flattening* de los dos elipsoides.

En la figura 54, podéis visualizar los parámetros de esta transformación (todos los parámetros menos el factor de escala).

Figura 54. Representación de los siete parámetros para una transformación de datum completa



Fuente: <http://www.cartesia.org>

Podéis ver la expresión matemática de esta transformación en la ecuación 7:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1 + s) \begin{bmatrix} 1 & Rz & -Ry \\ -Rz & 1 & Rx \\ Ry & -Rx & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

- X, Y, Z son las coordenadas en el datum origen,
- X', Y', Z' son las coordenadas en el datum destino,
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ son los términos de translación de cada uno de los ejes,
- Rx, Ry, Rz son los términos de rotación de los ejes,
- s es el factor de escala.

Hay que tener especial cuidado en definir los parámetros de la transformación de la ecuación 7 en las siguientes unidades: las traslaciones ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) en metros, las rotaciones (Rx, Ry, Rz) en radianes y el factor de escala (s) sin unidades.

Sin embargo, normalmente encontraremos que las rotaciones (Rx, Ry, Rz) se dan en segundos decimales y el factor de escala (s) en partes por millón (1 ppm), es decir, 1 cm por cada 10 km. En este caso, tendremos que multiplicar el factor de escala por 10^{-6} (10^6 es un millón) y transformar los segundos decimales en radianes con la siguiente expresión:

$$\text{Grados decimales} = \frac{\text{Segundos decimales}}{3.600}$$

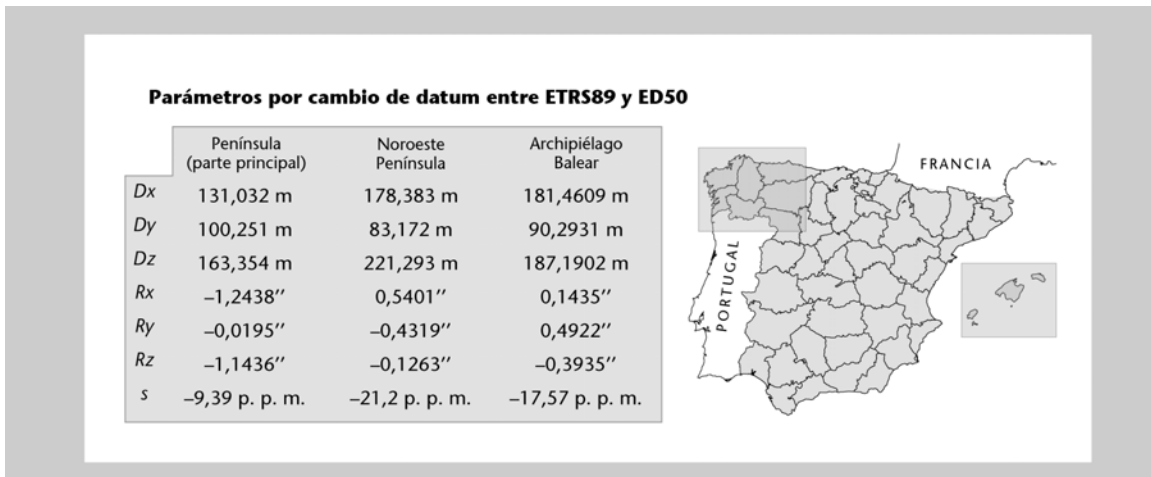
$$\text{Radianes} = \text{Grados decimales} \cdot \frac{\pi}{180}$$

Grados decimales

Los grados decimales son grados sexagesimales expresados en notación decimal. Por ejemplo, $43^\circ 12' 34,2''$ se expresa en forma decimal como $43,2095^\circ = 42 + (12/60) + (34,2/3600)$.

En la figura 55 se muestran los parámetros relativos al cambio de datum ETRS89 a ED50 para la Península Ibérica proporcionados por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Estos parámetros son aplicables al modelo de Bursa-Wolf en el sentido de la transformación de ETRS89 a ED50. Observad que, dado que ETRS89 en la práctica es equivalente a WGS89, estos mismos parámetros sirven para la transformación entre WGS84 y ED50.

Figura 55. Parámetros para el cambio de datum entre ETRS89 a ED50 en la Península Ibérica para el modelo de Bursa-Wolf



Fuente: Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) (<http://www.cnig.es>)

Fijaos en cómo el ángulo de rotación está expresado en segundos decimales y cómo el factor de escala está expresado en partes por millón. Si, por ejemplo, cogemos los parámetros correspondientes a la parte principal de la Península, para utilizar la ecuación 7 habría que expresarlos como:

$$\begin{aligned}\Delta x &= 131,032 \text{ m} \\ \Delta y &= 100,251 \text{ m} \\ \Delta z &= 163,354 \text{ m} \\ Rx &= -0,0000060301 \text{ rad} \\ Ry &= -0,0000000945 \text{ rad} \\ Rz &= -0,0000055443 \text{ rad} \\ s &= -0,00000939\end{aligned}$$

Otro aspecto importante sobre la ecuación 7 es el signo de los parámetros de rotación o, dicho de otra manera, el sentido de rotación de los ángulos. En el modelo de Bursa-Wolf el sentido de los ángulos es el del movimiento de las agujas del reloj. En caso de que la rotación fuera en sentido contrario, la transformación se llama *de Helmert* o *position frame* y su expresión matemática viene dada por la ecuación 8:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1 + s) \begin{bmatrix} 1 & -Rz & Ry \\ Rz & 1 & -Rx \\ -Ry & Rx & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.9.2. Calculadoras geodésicas

Acabamos de ver la formulación matemática de las transformaciones de datum más usuales. La complejidad de las ecuaciones 6, 7 y 8 hacen que sea necesaria la automatización para su uso. La automatización de los diferentes procesos de transformación entre sistemas de coordenadas es lo que se conoce con el nombre genérico de **calculadora geodésica**.

Podemos encontrar múltiples ejemplos de calculadoras geodésicas que nos permitirán transformar puntos de una proyección a otra, transformar cotas de un tipo de altura a otra, o bien realizar cambios de datum. A continuación se presenta un listado de las diferentes utilidades geodésicas que nos han parecido más interesantes:

- Utilidades geodésicas del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN)

En las figuras 57 y 58 se muestra un ejemplo de transformación de coordenadas expresadas en UTM ED50 a geográficas en ETRS89. Se realiza en dos pasos, transformando primero las coordenadas de la proyección UTM a geográficas en ED50 (cambio de proyección) para a continuación transformar las coordenadas geográficas de ED50 a ETRS89 (cambio de datum).

Utilidades geodésicas del IGN:
http://www.ign.es/ign/es/IGN/calculadora_geodesica.jsp

Figura 57. Conversión de coordenadas UTM ED50 a coordenadas geográficas

The screenshot shows a web form for converting UTM ED50 coordinates to geographic coordinates. The input fields are: x UTM (415951.942 m), y UTM (4539445.914 m), Hemisferio (N), and Huso (31). The output fields are: Longitud (2° 0' 2.41513" E), Latitud (41° 0' 4.17838" N), Anamorfosis (0.999686790 m), and Convergencia (0° 39' 23.84272").

Fuente: Instituto Geográfico Nacional de España (IGN)

Figura 58. Conversión de coordenadas geográficas ED50 en ETRS89

The screenshot shows a web form for converting geographic ED50 coordinates to ETRS89 coordinates. The input fields are: Longitud ED50 (2° 0' 2.41513" E) and Latitud ED50 (41° 0' 4.17838" N). The output fields are: Longitud ETRS89 (1° 59' 58.2837" E) and Latitud ETRS89 (41° 0' 0.1008" N).

Fuente: Instituto Geográfico Nacional de España (IGN)

- Calculadoras geodésicas del Instituto Cartográfico de Cataluña

En la figura 59 podéis ver un ejemplo de transformación de datum con coordenadas UTM en el sistema ED50 a coordenadas geográficas en el sistema ETRS89. Podéis comparar este ejemplo con el mostrado en las figuras 57 y 58, dado que los datos utilizados son los mismos, aunque en este caso la transformación se realiza en un único paso.

Figura 59. Conversión de coordenadas UTM en el sistema ED50 a coordenadas en el sistema ETRS89 y viceversa en Cataluña.

Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

- Utilidades geodésicas del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV). TransICV realiza cálculos en proyección UTM, cálculos en el elipsoide de referencia y cambio de datum ED50 a ETRS89.
- Geodetic Calculation Methods. Geoscience Australia (Australian Government)
- Software geodésico gratuito desarrollado por el National Geodetic Survey (NGS) de los Estados Unidos
- Gencoord Plus. Podéis ver el aspecto de esta aplicación en la figura 60.

Figura 60. Pantalla de ejemplo de la calculadora geodésica comercial Gencoord Plus

Fuente: EOSGIS

- En la web de Gabriel Ortiz también podéis encontrar una calculadora geodésica.

En las figuras 61 y 62 podéis ver el mismo ejemplo mostrado que en otras calculadoras presentadas anteriormente. En este caso hay que destacar la posibilidad de escoger el método de transformación de datum de tres o siete parámetros.

Calculadoras geodésicas del Instituto Cartográfico de Cataluña:
http://www.icc.cat/web/content/ca/prof/geodesia/eines_geodesiques.html

Dirección recomendada
 Os podéis bajar de forma gratuita el programa TransICV: <http://www.icv.gva.es/ICV/recursos.jsp?CODSEC=4&IdmGl=VAL>

Geodetic Calculation Methods. Geoscience Australia:
<http://www.ga.gov.au/geodesy/datums/calcs.jsp>

Software geodésico del NGS:
http://www.ngs.noaa.gov/PC_PROD/pc_prod.shtml

EOSGIS: <http://www.eosgis.com>

Calculadora geodésica en la web de Gabriel Ortiz:
http://www.gabrielortiz.com/conversor_coordenadas2/conversor.asp

Figura 61. Parámetros de entrada de la transformación de coordenadas UTM ED50 a geográficas en ETRS89

CONVERSION DE COORDENADAS CARTOGRAFICAS
U.T.M., Lambert, Mercator, Gauss-Krüger, y geodésicas-geográficas
Cambios de datum con sistemas de ecuaciones de 3 parámetros, 7 parámetros y NTv2

COORDENADAS DE PARTIDA

¿Cuántas posiciones desea convertir?

¿Qué tipo de coordenadas desea convertir?

X: Y: Z:

(*La Z es opcional. Ha de estar referida al elipsoide. Sólo sirve para transformaciones de datum con 3 y 7 parámetros)

Elipsoide de partida:

Proyección de partida:

PARAMETROS

Huso: Hemisferio:

(*Valores por defecto válidos para parte de España. Modifique los parámetros según proceda)



COORDENADAS DE DESTINO

Tipo de coordenadas de destino:

Elipsoide de destino:

Fuente: <http://www.gabrielortiz.com>

Figura 62. Transformación de coordenadas UTM ED50 a geográficas en ETRS89

PARAMETROS DE PARTIDA	PARAMETROS DE DESTINO
Tipo de Coordenadas: Proyectadas Proyección: UTM (Universal Transversa de Mercator) Huso: 31 Hemisferio: N Elipsoide de partida: Internacional 1924 (Hayford o Int. 1909, ED50)	Tipo de Coordenadas: Geodésicas Elipsoide de destino: GRS80 (ETRS89)
 <p>Método de Transformación de Datum: Transformación de 7 parámetros, con los siguientes valores: Dx=131.032 Dy=100.251 Dz=163.354 Rx=1.2438° Ry=0.0195° Rz=1.1436° Factor de Escala=-9.39 p.p.m.</p>	
 <p>Descargar Fichero TXT</p>	
COORDENADAS DE PARTIDA	COORDENADAS DE DESTINO
415951.942 4539445.91 23.452	1° 59' 58.254" E 41° 0' 0.079" N 86.361

Resultado de la transformación de coordenadas UTM ED50 a geográficas en ETRS89, mediante el método de transformación de datum de siete parámetros.
 Fuente: <http://www.gabrielortiz.com/peu>

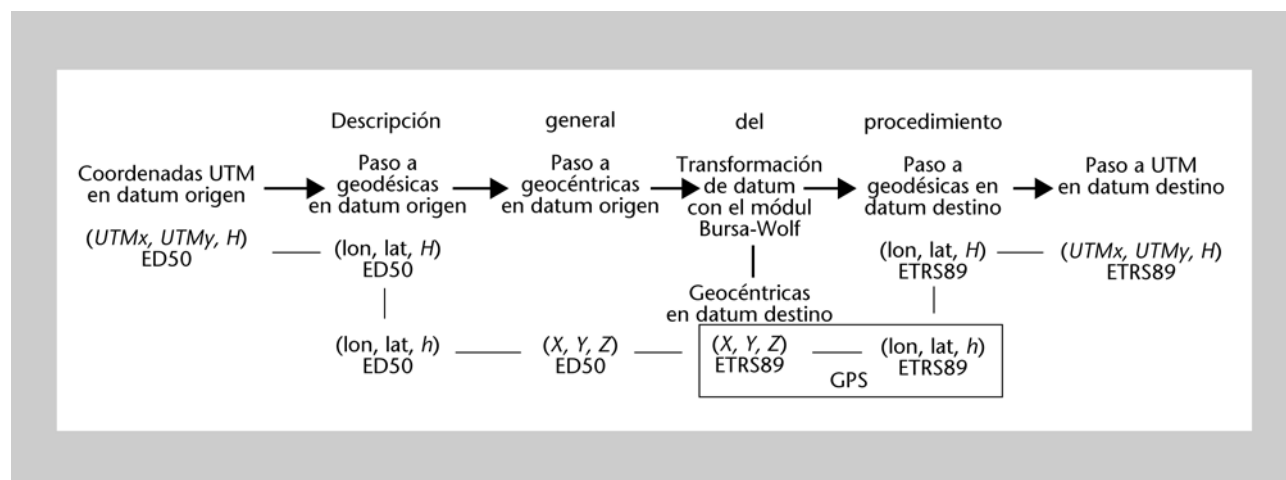
1.9.3. Ejemplo de cambio de datum

Ahora que ya hemos visto la vertiente más teórica de los dos métodos más comunes de transformación entre sistemas de referencia geodésicos (datum), y dado que, además, conocemos las principales herramientas geodésicas disponibles en Internet, pondremos en práctica todos estos conocimientos realizando una transformación de datum aplicando el método de Bursa-Wolf.

El ejemplo que explicaremos consistirá en una transformación de coordenadas UTM en el datum ED50 a coordenadas UTM en el datum ETRS89 (que sabemos que es equivalente al WGS84). Escogeremos un punto de coordenadas conocidas como es el vértice geodésico EBRO de la red de estaciones permanentes GNSS de Cataluña situado en el Observatorio del Ebro en Roquetas (Tarragona).

La figura 63 muestra el procedimiento general que debe seguirse para realizar esta transformación. Fijaos en que, antes de realizar la transformación de datum propiamente dicha, hay que transformar las coordenadas de manera que se expresen como geocéntricas (ved el subapartado 1.2.2), que son las coordenadas sobre las cuales se aplica el método de Bursa-Wolf. En un recuadro se han destacado los sistemas de coordenadas que obtenemos con un sistema GPS.

Figura 63. Descripción del procedimiento general para transformar un punto de UTM ETRS89 a UTM ED50



Fuente: imagen adaptada de <http://www.gabrielortiz.com>

Aunque la transformación de datum se puede hacer de manera automática con la mayoría de los recursos que acabamos de ver en el subapartado 1.9.2, ahora pasamos a describir cada uno de los pasos del procedimiento de transformación que muestra la figura 63 para poder entender en profundidad este proceso:

1) Transformar coordenadas UTM a geodésicas (geográficas) con mismo datum origen ED50

La descripción de este proceso no se encuentra dentro del objetivo de este módulo, pero podéis utilizar cualquiera de las herramientas geodésicas que he-

mos explicado en el subapartado 1.9.2. Para este ejercicio concretamente usaremos las calculadoras geodésicas proporcionadas por el ICC.

Las coordenadas del vértice EBRO, que podéis obtener en http://www.icc.cat/web/content/ca/prof/geodesia/coord_catnet.html, son UTM huso 31 N ED50 con altura ortométrica:

$$\begin{aligned}UTMx &= 288.618,46 \text{ m} \\UTMy &= 4.522.103,48 \text{ m} \\H &= 58,21 \text{ m}\end{aligned}$$

Haciendo uso de <http://www.icc.cat/web/content/php/geotex/geoutm.php> encontramos que las coordenadas geodésicas sobre ED50 (elipsoide internacional de Hayford) son:

$$\begin{aligned}\text{Longitud} = \lambda &= 0^\circ 29' 36,7902'' \\ \text{Latitud} = \varphi &= 40^\circ 49' 19,3227''\end{aligned}$$

2) Paso de geodésicas a geocéntricas en datum origen ED50

Una vez que tenemos las coordenadas geodésicas (λ , φ) en ED50, debemos calcular las coordenadas X , Y , Z cartesianas geocéntricas (ved el subapartado 1.2.2). Para hacer este cálculo utilizaremos la ecuación 9:

$$\begin{aligned}X &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ Z &= \left(\frac{b^2}{a^2} \cdot N + h \right) \cdot \sin \varphi\end{aligned}\tag{9}$$

Donde:

λ es la longitud,

φ es la latitud,

h es la altitud elipsoidal,


a es el semieje mayor del elipsoide de referencia,

b es el semieje menor del elipsoide de referencia,

N es el radio de curvatura en la vertical principal del punto y se expresa matemáticamente como la ecuación 10:

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}\tag{10}$$

Observad que la ecuación 9 utiliza alturas de tipo elipsoidal (h) y el tipo de altura que tenemos es ortométrica (H). Por tanto, hay que calcular la altura elipsoidal con la ecuación 1, de manera que debemos conocer la ondulación del geoide.

 Recordad que la ecuación 1 la vimos en el subapartado 1.5.3 de este módulo.

La ondulación del geoide en el punto (λ, φ) en ED50 es de $-22,288$ m. Entonces, la altura elipsoidal en el punto dado es:

$$h = H + N = 58,21 - 22,288 = 35,922$$

Para calcular las coordenadas geocéntricas en ED50 utilizaremos: <http://www.icc.cat/web/content/php/geotex/gdesgcen.php>. Y obtendremos los siguientes valores:

$$X = 4.833.601,217 \text{ m}$$

$$Y = 41.638,260 \text{ m}$$

$$Z = 4.147.581,096 \text{ m}$$

3) Cambio de datum con el modelo de Bursa-Wolf

Ahora que ya tenemos el punto inicial expresado en geocéntricas en ED50, podemos aplicar el método de Bursa-Wolf descrito en la ecuación 7. De esta ecuación se deduce que la solución está dada por:

$$X' = \Delta x + (1 + s) \cdot (X + Rz \cdot Y - Ry \cdot Z)$$

$$Y' = \Delta y + (1 + s) \cdot (-Rz \cdot X + Y + Rx \cdot Z)$$

$$Z' = \Delta z + (1 + s) \cdot (Ry \cdot X - Rx \cdot Y + Z)$$

Los siete parámetros necesarios para la transformación de Bursa-Wolf los obtendremos del archivo datums.zip de la web de recursos geodésicos del ICC (ved la figura 53).

Recordad que es importante escoger los parámetros correspondientes a la transformación en el sentido en que lo estamos realizando, es decir, de ED50 (código 100) a ETRS89 (código 700). Entonces hay que utilizar la transformación con código 100700008.

Los parámetros de esta transformación son los siguientes:

$$\Delta x = -128,14907 \text{ m}$$

$$\Delta y = -70,93672 \text{ m}$$

$$\Delta z = -182,41914 \text{ m}$$

$$Rx = 0,000002632283 \text{ rad}$$

$$Ry = 0,000002701445 \text{ rad}$$

$$Rz = 0,000008649425 \text{ rad}$$

$$s = 0,000011515027$$

Y aplicando la fórmula obtenemos las coordenadas geocéntricas en ETRS89:

$$X = 4.833.520,3633 \text{ m}$$

$$Y = 41.536,841 \text{ m}$$

$$Z = 4.147.461,298 \text{ m}$$

4) Paso de geocéntricas a geodésicas en datum destino ETRS89

Para calcular las coordenadas geodésicas en ETRS89 utilizaremos <http://www.icc.cat/web/content/php/geotex/gdesgcen.php>. Y obtenemos el siguiente resultado:

$$\begin{aligned}\text{Longitud} = \lambda &= 0^\circ 29' 32,49227'' \\ \text{Latitud} = \varphi &= 40^\circ 49' 15,18673'' \\ h &= 107,796 \text{ m}\end{aligned}$$

De la misma manera que antes calculamos la altura elipsoidal, ahora debemos calcular la altura ortométrica para el punto dado en ETRS89.

Tenemos que la ondulación del geoide en este punto es de 49,580 m. Entonces la altura ortométrica vale:

$$H = h - N = 107,796 - 49,580 = 57,216 \text{ m}$$

5) Paso de geodésicas en UTM en el mismo datum destino ETRS89

Finalmente, sólo nos queda transformar las últimas coordenadas geográficas con cota ortométrica expresadas en ETRS89 a la proyección UTM. Igual que antes, utilizaremos <http://www.icc.cat/web/content/php/geotex/geoutm.php>.

Y obtenemos las coordenadas UTM iniciales expresadas en el datum ETRS89:

$$\begin{aligned}UTM_x &= 288.523,7159 \text{ m} \\ UTM_y &= 4.521.900,1484 \text{ m} \\ H &= 57,981 \text{ m}\end{aligned}$$

Para verificar el resultado de este proceso, podéis consultar los datos de la estación EBRO en el siguiente enlace: www.icc.cat/web/content/ca/prof/geodesia/catnet.html.

2. Cartografía

El segundo apartado de este módulo está dedicado a la cartografía. Esta disciplina, entendida como la representación espacial de los fenómenos geográficos, forma parte del conjunto de ciencias y técnicas que se integran dentro de los sistemas de información geográfica (SIG).

No se pretende dar una visión exhaustiva del método y la producción de mapas. Se trata de una visión general, necesaria y suficiente, de las nociones cartográficas básicas para entender los conceptos que los SIG utilizan para la integración de los datos territoriales.

Este apartado se estructura en cinco subapartados. El primero define qué es un mapa y qué se entiende por cartografía y realiza una contextualización histórica; el segundo describe y muestra los tipos de mapas más usuales; el tercero define el concepto de *escala* y explica sus diferentes tipos; el cuarto muestra los conceptos fundamentales para entender y leer un mapa, como el diseño cartográfico y finalmente, el quinto y último subapartado se dedica al tratamiento que se le da al tema de la altura en los mapas topográficos.

2.1. El origen de los datos: la cartografía


La cartografía, la creación y uso de los mapas, la han utilizado los humanos desde la antigüedad. Para poder entender qué es la cartografía, hay que entender la definición y el propósito de los mapas.

Los mapas son unas herramientas que utilizamos para visualizar la representación de los datos. Son una convención, una simbolización de la realidad; en definitiva, una manera de representar la información geográfica. El tipo de datos que representaremos dependerá del área cartografiada y de la escala del mapa, y definirá el tipo de mapa que se generará.

2.1.1. Definición de mapa

Según la Asociación Cartográfica Internacional (en inglés, *International Cartographic Association*, ICA), un mapa es la representación gráfica abstracta de la superficie de la Tierra que muestra las relaciones espaciales entre las características geográficas, generaliza sus apariencias simplificándolas con fines comunicativos y aplica símbolos para facilitar su interpretación.

De una manera simple, los mapas son la representación del mundo real reducido a puntos, líneas y polígonos mediante el uso de símbolos gráficos. Por lo



Los sistemas de información geográfica se tratan en profundidad en el módulo "Introducción a los sistemas de información geográfica".

Asociación Cartográfica Internacional

La Asociación Cartográfica Internacional o International Cartographic Association (ICA) es una organización que promueve la disciplina de la cartografía en un contexto internacional mediante la definición de estándares técnicos en cartografía, la investigación y resolución de problemas prácticos y la educación con sus publicaciones, seminarios y conferencias.

tanto, un mapa es una abstracción de la realidad. El trabajo del cartógrafo consiste en seleccionar la información que es esencial para el propósito del mapa y para la escala a la que se realiza.

2.1.2. Definición de cartografía y aproximación histórica

La cartografía no es sólo la técnica para mostrar unos datos en un mapa, sino que también incluye la creación y producción de un mapa, así como su diseño y, finalmente, el uso de este mapa.

Asociación Cartográfica
Internacional:
<http://www.icaci.org>

La cartografía es el arte, la ciencia y la técnica del diseño, producción y utilización de representaciones que transmiten información espacial mediante un sistema geométrico de símbolos gráficos.

Un caso particular de representación cartográfica son los mapas. Éstos son una representación plana, a escala, generalizada y explicativa de las manifestaciones de la Tierra o del Universo.

La percepción que tenemos las personas del mundo donde vivimos está mediatizada por la cartografía. Desde las antiguas culturas que dibujan su mundo conocido hasta la imagen del planeta que obtenemos de los satélites, está la descripción de la imagen geográfica que cada cultura tiene y ha tenido del planeta. Ahora vamos a ver, pues, cuál fue el origen y cómo se fue desarrollando esta imagen geográfica.

Desde siempre las personas han tenido una idea determinada del lugar donde viven y se han esforzado para conocerlo, describirlo y representarlo. Desde la descripción de los lugares más próximos hasta la exploración del espacio, la humanidad ha recorrido un largo camino para conocer con exactitud la tierra donde vivimos. De esta inquietud y necesidad nació la geografía, del griego *gea*, que quiere decir 'Tierra', y *graf*, que quiere decir 'descripción', y la cartografía, que tiene como finalidad elaborar e interpretar mapas.

La utilización de los mapas parece ser anterior a la escritura. Las muestras más antiguas que nos quedan, si obviamos pinturas de cuevas que parecen representar el territorio, son una placa de arcilla encontrada en Mesopotamia, en el norte de Bagdad (actual Irak), que tiene una antigüedad de 5.000 años.

En la figura 64 podéis ver lo que se llama *la representación Babilónica del mundo*. En este mapa, además de los caracteres cuneiformes podemos ver un sistema normalizado de símbolos que representan un patrón de edificios y/o planos de tierras situados cerca de un curso de agua. Según la interpretación intuitiva de los símbolos que se repiten y su relación en el espacio, se supone que representaban mediciones sobre terrenos con la finalidad de cobrar impuestos. En

Dirección recomendada

Si queréis saber más sobre el sistema matemático desarrollado por los babilonios, podéis consultar el siguiente enlace de la Universidad de St Andrews, Escocia: http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Babylonian_numerals.html

esta placa de arcilla también encontramos representado el sistema sexagesimal desarrollado por los babilonios y es el ejemplo de mapa topográfico más antiguo que se conoce.

Figura 64. Placa de arcilla babilónica



Las antiguas placas de arcilla babilónicas representan la Tierra como un disco plano circular (Babilonia, 2300 a. C. aprox.).
Fuente: <http://math.rice.edu/~lanius/pres/map/maphis.html>

Cincuenta siglos antes de nuestra era ya confeccionaron mapas los egipcios, los babilonios, los asirios y los chinos. No obstante, las primeras representaciones cartográficas se atribuyen a los griegos. Gracias a sus conocimientos matemáticos y astronómicos, establecieron las bases científicas para indicar en los mapas las observaciones que se iban haciendo en los viajes.

La idea de que la Tierra tiene forma esférica fue ampliamente aceptada durante el periodo griego y se realizaron numerosos esfuerzos para determinar sus dimensiones. En el año 228 a. C. el filósofo griego **Eratóstenes**, director de la Biblioteca de Alejandría, realizó una medición de la Tierra que demostró su forma redonda, y calculó su perímetro sólo con un error del 1%.

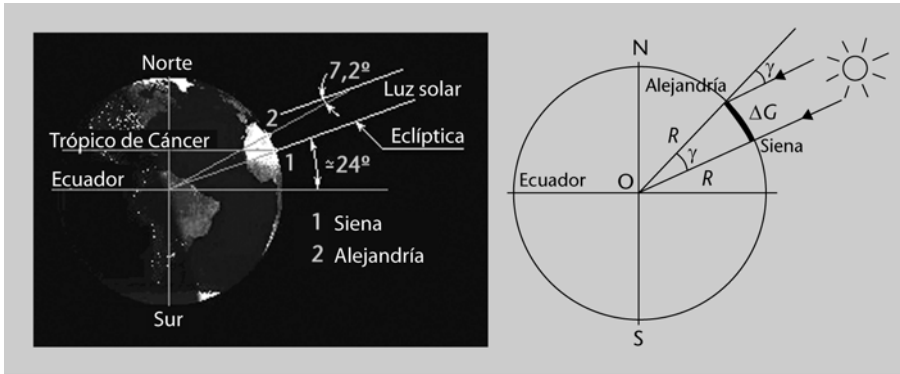
La figura 65 muestra el esquema de su técnica, que era tan sencilla como revolucionaria. Podemos ver representada la localización de las dos mediciones que realizó. Por una parte, midió la sombra del Sol al mediodía del día del **solsticio de verano** en la ciudad de Alejandría; y por la otra, al año siguiente el mismo día a la misma hora, hizo la misma medición en Siena (Asuán, Egipto) una ciudad situada unos 800 kilómetros más al sur. Esta distancia se ve representada en la figura 65 con ΔG .

Fijaos en que los rayos solares, representados en la figura de la derecha por las líneas con una flecha, caen de forma perpendicular en Siena, sin sombra, y en la ciudad de Alejandría lo hacen con una pequeña inclinación de $\gamma = 7,2^\circ$ ($7^\circ 12'$).

Solsticio de verano

El solsticio de verano es el momento en que el eje de rotación de la Tierra se encuentra más próximo a la dirección Tierra-Sol. El Sol se encuentra sobre el Trópico de Cáncer y marca el comienzo del verano en el hemisferio norte. En el solsticio de verano se da el día más largo y la noche más corta del año.

Figura 65. Método usado por Eratóstenes para medir el perímetro de la Tierra



Fuente: adaptado de <http://es.wikipedia.org>

Este valor de $7^{\circ} 12'$ representa $1/50$ (una quincuagésima parte) de un círculo y, dado que Eratóstenes conocía la distancia entre las dos ciudades, calculó el perímetro de la Tierra y demostró su esfericidad. Obtuvo un valor de 40.234 km. Actualmente, el valor que tenemos de la circunferencia de la Tierra en el ecuador es de 40.074 km. Así pues, ¡sólo se equivocó de 160 km!

El máximo exponente de la época griega es **Claudio Ptolomeo** de Alejandría (siglo II d. C.), que escribió una obra monumental que fue obra de referencia en geografía hasta el Renacimiento. Esta obra, llamada *Almagesto*, estaba formada por trece volúmenes donde se describía la teoría matemática del movimiento del Sol, de la Luna y de los planetas. En su obra *Geographia*, cuya portada podéis ver en la figura 66, definió los elementos y la forma de la cartografía científica. A pesar de los errores que cometió, Ptolomeo se adelantó a su tiempo en cómo debía hacerse la investigación científica.

Ptolomeo fue uno de los astrónomos y geógrafos griegos que ejerció una mayor influencia en su tiempo. Su **teoría geocéntrica** se mantuvo durante más de 1.400 años. 🚫

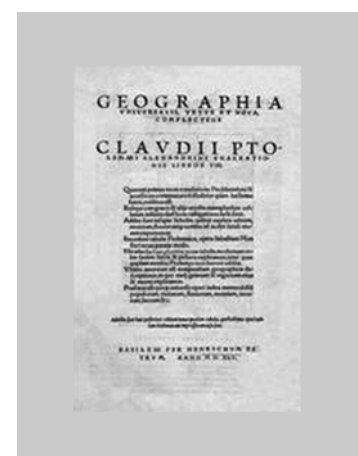
Así como los griegos protagonizaron algunas de las épocas más fecundas en relación con el estudio de la Tierra, durante el periodo de hegemonía romana se retornó a la antigua imagen de la Tierra en forma de disco o plataforma circular. La aportación de los romanos a la teoría geográfica fue casi nula, aunque se preocuparon por cuestiones prácticas, como establecer catastros con finalidades militares y fiscales o construir las maravillosas calzadas romanas, que permitían un desplazamiento más fácil y rápido por el interior del Imperio Romano.

Pero no todo seguiría el mismo camino que marcaba Ptolomeo, sino que, con una religión cada vez más creciente e influyente y la posterior caída del Imperio Romano, sigue un periodo donde las representaciones cartográficas pierden precisión, son más subjetivas e imaginarias, muy influenciadas por el sentido religioso de la época: las ciudades se dibujan con las casas y las iglesias, los ríos con las barcas, el mar con los peces...

Teoría geocéntrica de Ptolomeo

La teoría geocéntrica de Ptolomeo describe un modelo de Universo con la Tierra en el centro. En el modelo, la Tierra está fija mientras que el Sol, la Luna y los planetas trazan complicadas órbitas a su alrededor.

Figura 66. Portada de *Geographia universalis vetus et nova*, obra de Ptolomeo



El mapamundi típico de la edad media continúa siendo en forma de disco, como el que utilizaban los romanos. Estos mapas se conocen como los de la T y la O. Tal como podéis ver en la figura 67, se trata de una representación esquemática del mundo, donde Jerusalén se representaba en el centro, y el este del mapa estaba orientado hacia el norte. Asia está en la parte superior, con el Paraíso Terrenal, y en la parte inferior está Europa y África separadas por el Mediterráneo; el Río Océano rodea toda la Tierra.

Durante el siglo XIII, con el inicio de la utilización de la brújula, y hasta finales del siglo XV, los mapas se caracterizan por la reproducción de las líneas de costas, corrientes de agua e itinerarios de viajes; también registran lugares, montañas y masas de agua situadas en las sucesivas direcciones de la rosa de los vientos. De este periodo son las primeras cartas náuticas. Estos mapas o cartas aparecieron sobre pergamino y eran prácticamente inseparables del llamado *portulano*: se trataba de una descripción, en prosa, de la costa con indicación de los rasgos más característicos visibles desde un barco y mención expresa del rumbo que debía seguir la nave y de las distancias entre dos puntos determinados. Uno de los portulanos más conocido es el *Atlas catalán*, elaborado en año 1375 por los hermanos cartógrafos mallorquines Cresques, y que se considera como uno de los más perfectos de su época.

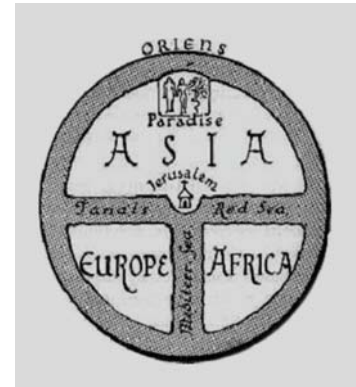
En el siglo XVI se producirá una serie de cambios que nos llevarán a la época de los grandes descubrimientos geográficos, y como consecuencia a la modernización de los mapas y de la concepción esférica de la Tierra. En el Renacimiento se producen tres hechos importantes que marcan un hito en la historia de la cartografía. El primero, el reencuentro en Occidente de la *Geographia* de Ptolomeo. El segundo hecho que impulsó el progreso de esta ciencia fue la invención de la imprenta y el grabado. El tercero, y más importante, fueron los grandes descubrimientos geográficos.

Los primeros mapas de todo el mundo aparecieron al principios del siglo XVI, gracias a los viajes de Colón y otros descubridores. Combinando el conocimiento ptolemaico y las aportaciones de los portulanos, se creó el nuevo escenario para el desarrollo cartográfico renacentista hasta la época de Mercator, que puso fin al imperio cartográfico de Ptolomeu a mediados del siglo XVI.

Gerardus Mercator de Flandes, cuyo retrato podéis ver en la figura 68, fue el principal cartógrafo de la época de los descubrimientos. Desarrolló una proyección cilíndrica que todavía se utiliza ampliamente en las cartas náuticas y mapas del mundo y que hemos explicado en el subapartado 1.3.5. Esta proyección resultó de un valor incalculable para los navegantes, ya que permitía hacer una ruta en línea recta entre dos puntos del mapa, que se podían seguir sin cambiar la dirección magnética de la brújula.

Con esta proyección, Mercator confeccionó un planisferio para ayudar a los navegantes a determinar sus rutas. Este planisferio tiene un marcado carácter

Figura 67. Isidoro de Sevilla, mapamundi del siglo VI. Jerusalén está en el centro del Universo.



El mundo según san Isidoro

Fijaos en que la imagen del mundo que dio san Isidoro, obispo de Sevilla, vuelve a representar la Tierra como una superficie circular y se pierde totalmente la idea de esfericidad.

Figura 68. Gerardus Mercator



eurocéntrico, recalca la superioridad de Europa en un momento en que se inicia la europeización del mundo. No había dividido el planisferio en dos mitades iguales, sino que desplazó el ecuador y utilizó dos tercios del mapa para representar el hemisferio norte y mostrar las potencias coloniales mayores de lo que eran en realidad. Aun así, el mapa de Mercator marcó la imagen del planeta durante cuatrocientos años.

En el siglo XVII se establecieron los principios científicos de la cartografía, y las inexactitudes más notables de los mapas quedaron en las partes del mundo que no se habían explorado. Hacia finales del siglo XVIII, cuando decayó el espíritu explorador y empezó a desarrollarse el nacionalismo, un gran número de países europeos comenzó a emprender estudios topográficos detallados en el ámbito nacional. El mapa topográfico completo de Francia se publicó en 1793 y, posteriormente, Reino Unido, Austria, Suiza y otros países siguieron su ejemplo. En Estados Unidos se organizó en 1879 el Instituto de Estudios Geológicos (en inglés, *United States Geological Survey*) con la finalidad de confeccionar mapas topográficos de gran escala en todo el país.


En el siglo XX, la cartografía experimentó una serie de importantes innovaciones técnicas. La fotografía aérea se desarrolló durante la Primera Guerra Mundial y se utilizó, de manera más generalizada, en la elaboración de mapas durante la Segunda Guerra Mundial. Y desde el lanzamiento en la década de 1970 de los satélites Landsat por parte de los Estados Unidos, se están realizando estudios de la superficie terrestre por medio de equipos fotográficos de alta resolución. Por lo tanto, la cartografía moderna se basa en una combinación de observaciones sobre el terreno y la **teledetección**.

Teledetección

La teledetección es la técnica que permite obtener información de la superficie terrestre mediante sensores de observación remotos, es decir, sin tener contacto con ella. Sus fuentes de información principales son las mediciones y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales. Este proceso se realiza grabando la energía emitida y procesando, analizando y aplicando esta información.

La cartografía en el siglo XXI da un paso adelante con el ambicioso proyecto Galileo. Galileo es el nombre que recibe la iniciativa europea para desarrollar un sistema global de navegación por satélite, de titularidad civil, que proporcione a Europa independencia con respecto a los sistemas actuales: GPS (USA) y Glonass (Rusia).

Con los adelantos tecnológicos de la última década, la cartografía se ha transformado en un elemento fundamental de la sociedad de la información; en una herramienta imprescindible para el análisis socioeconómico del territorio, para planificar estructuras y para valorar las necesidades administrativas, entre muchas otras aplicaciones. Las herramientas informáticas que se han establecido para el análisis de la cartografía con los objetivos anteriormente mencionados



La teledetección se trata en el módulo "Introducción a los sistemas de información geográfica".

Dirección recomendada

Para saber más sobre la teledetección, podéis visitar el siguiente enlace:

<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/index.htm>,

donde encontraréis un curso muy recomendable titulado *Fundamentos de la teledetección*.

son los sistemas de información geográfica (SIG), tal como ya apuntábamos en la introducción de este apartado.

2.2. Tipos de mapas

En el subapartado anterior hemos visto que un mapa es una abstracción de la realidad y que la información que contiene varía en función de su objetivo. Los objetivos son tan variados como localizar lugares en la superficie de la Tierra, mostrar patrones de distribución de un determinado suceso, o establecer relaciones entre diferentes fenómenos mediante el análisis de la información que muestra el mapa, entre otros.

Cada mapa se elabora con un propósito y de la manera más adecuada para cumplir su objetivo. Algunos mapas, de propósito general, muestran carreteras, ciudades, ríos, etc. Otros se obtienen como generalización de los mapas base o bien dan información relativa a un único concepto.

Para establecer una clasificación de la cartografía nos basaremos en la Ley 7/1986, de 24 de enero, de Ordenación de la Cartografía, que dice que la cartografía oficial se clasifica en **básica**, **temática** y **derivada**. Veremos cada una de estas cartografías por separado.

2.2.1. Cartografía básica


Los mapas base, llamados también *fundamentales* o *topográficos*, son mapas que muestran los elementos de la superficie, tradicionalmente vinculados a la topografía y a la forma de la Tierra, de la manera más fiel posible dentro de las limitaciones de la escala.

A continuación se describen algunos mapas de este tipo:

1) Mapas topográficos

Los mapas topográficos pretenden darnos una información precisa de los objetos del territorio y su situación, así como del relieve, las grandes áreas de cobertura del suelo e información adicional como divisiones políticas, identificadores de carreteras, etc. Una información básica en los mapas topográficos es la representación del relieve. Los productos de cartografía topográfica se elaboran a partir de la **fotointerpretación** directa de la fotografía aérea u **ortofotos** digitales, o bien por generalización de bases cartográficas ya existentes.

En la figura 69 podéis ver una muestra de la cartografía topográfica en diferentes escalas producida por el ICC. Fijaos en cómo la escala 1:25.000 nos muestra



El concepto de **generalización** es muy importante en cartografía. Lo encontraréis ampliamente desarrollado en el subapartado 2.4.2 de este mismo módulo.

Dirección recomendada

Podéis leer el texto completo de la Ley de Ordenación de la Cartografía en el enlace de la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección (SECFT): <http://www.secft.org/legislacion.asp>

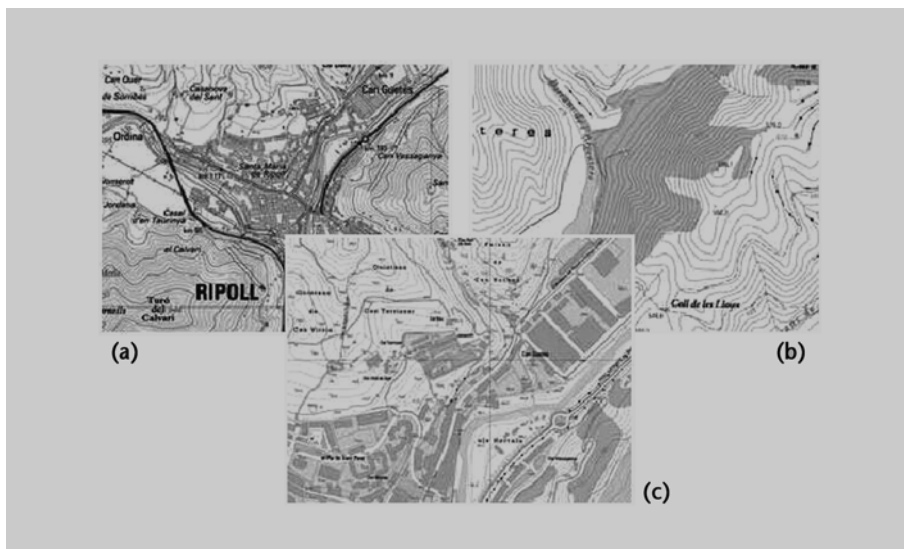
La **fotointerpretación** es la técnica de interpretación de la superficie terrestre a partir de fotografías.

Ortofoto

Una **ortofoto** es un documento cartográfico que consiste en una fotografía aérea vertical que ha sido rectificadas de manera tal que se mantiene una escala uniforme en toda la superficie de la imagen. Si sobre ésta y en sus márgenes se añade la información necesaria y complementaria que debe contener cualquier mapa, recibe el nombre de **ortofotomapa**.

claramente las vías de comunicación, así como la escala 1:5.000 muestra la estructura de las calles de las ciudades.

Figura 69. Mapas topográficos de Cataluña



Escalas: a. 1:25.000. b. 1:10.000. c. 1:5.000.

Fuente: adaptación de mapas del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

2) Mapas de imagen

Los mapas de imagen reproducen una imagen tomada, bien desde un avión, bien desde un satélite, tanto por medios fotográficos como por sensores digitales. Las fotografías o imágenes originales, o el mosaico de fotografías, como sucede generalmente, se rectifican geoméricamente y se convierten en productos de ortofotomapa o de ortoimagen.

En la figura 70 podéis ver ejemplos de la cartografía ortofotográfica y de ortoimagen a escala 5.000 y 50.000 producida por el ICC.

Figura 70. Ortoimágenes de Cataluña



Escalas: a. 1:5.000. b. 1:50.000.

Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

3) Cartas náuticas

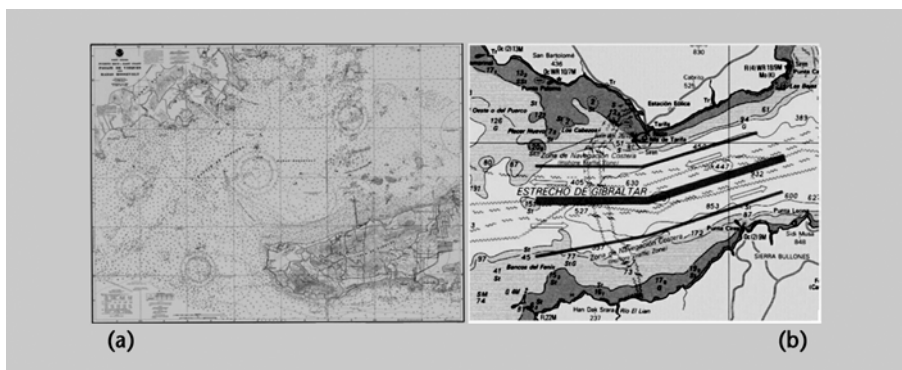
Las cartas náuticas representan a escala aguas navegables y áreas costeras. Normalmente indican la profundidad del suelo marino, detalles de la costa indicando los puertos y otros tipos de información de ayuda para la navegación.

Dirección recomendada

Podéis ver la evolución de la ciudad de Ottawa entre 1920 y el 2002 a partir de mapas topográficos en el siguiente enlace: http://ess.nrcan.gc.ca/2002_2006/sdki/visual/ottawa/topo_e.php

En la figura 71 se muestran dos cartas náuticas. La imagen 71a corresponde a una carta náutica de una sección de la costa de Puerto Rico producida por el NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration). En la imagen 71b, se muestra un detalle de la carta náutica *De Cabo de San Vicente al Estrecho de Gibraltar* 1:350.000 producida por el Instituto Hidrográfico de la Marina.

Figura 71. Cartas náuticas



a. Carta náutica de la costa de Puerto Rico. b. Carta náutica de la costa del estrecho de Gibraltar
Fuentes: a. <http://www.noaa.gov>. b. <http://www.armada.mde.es/ihm>

La **cartografía básica** es la que está orientada a la representación general de los fenómenos geográficos existentes en su ámbito, sin dar más intensidad a un fenómeno u otro.

2.2.2. Cartografía temática

Los mapas temáticos representan variables específicas del territorio. Se centran en la información de un tema concreto y pueden llevar información adicional del relieve. Utilizan como soporte la cartografía de base (topográfica u ortofotográfica) o derivada.

La procedencia de la información para la elaboración de cartografía temática es muy variada: cartografía topográfica, fotografía aérea vertical, imagen de satélite, otra cartografía temática, bases de datos cartográficas, datos estadísticos, trabajo de campo, documentos bibliográficos, etc.

La **cartografía temática** es la que utiliza como soporte la cartografía básica o derivada, sobre la que destaca o desarrolla algún aspecto concreto de la información topográfica contenida, o incorporando información adicional específica.

Por su propia naturaleza, los ejemplos de mapas temáticos son muy variados. Por ejemplo, dentro de esta categoría tenemos mapas geológicos, mapas de usos del suelo, de riesgo de incendios forestales, mapas de turismo, mapas de espacios de interés natural, mapas de tráfico, mapas de sismicidad y zonas de aludes, etc.



Logotipo del Instituto de Estudios Oceanográficos y Atmosféricos de los Estados Unidos (NOAA)

NOAA

El Instituto de Estudios Oceanográficos y Atmosféricos de los Estados Unidos (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) es una institución que se dedica a la observación de la Tierra con el fin de entender la dinámica cambiante de nuestro entorno.

NOAA: <http://www.noaa.gov>

Dirección recomendada

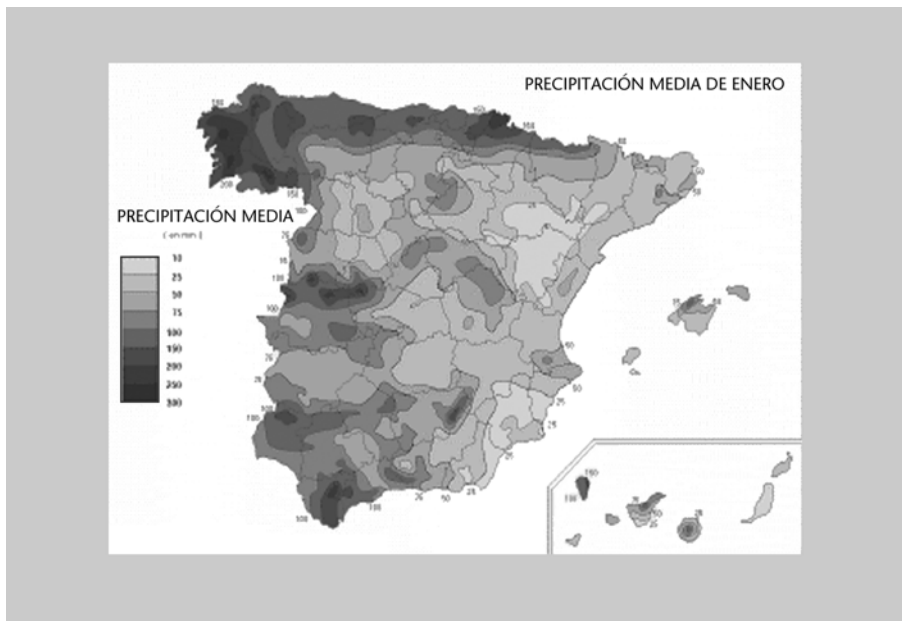
Para ver ejemplos de diferentes mapas temáticos, os podéis conectar al enlace <http://plasma.nationalgeographic.com/mapmachine>.

En el apartado llamado *More Theme Maps* podéis ver mapas del mundo que muestran la variación de temperatura para analizar el cambio climático, mapas de densidad, mapas de desastres naturales, etc.

Ejemplo de mapa temático

En la figura 72 tenéis un ejemplo de mapa temático donde se muestra la precipitación media (índice pluviométrico) del mes de enero en España. Notad que es un mapa sobre el que se desarrolla un aspecto concreto, en este caso el índice de lluvia, y que no lleva ningún otro tipo de información topográfica asociada.

Figura 72. Mapa del índice pluviométrico de la Península Ibérica



Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN)

2.2.3. Cartografía derivada

Los mapas derivados se elaboran a partir de otros documentos cartográficos. Aunque también se considera cartografía derivada la presentación de cartografía existente como otros tipos de documentos (atlas, mapa en relieve) u otros soportes (CD-ROM, web).

La **cartografía derivada** es la formada por procesos de adición o generalización de la información topográfica contenida en la cartografía básica preexistente.

Como ejemplo clásico de cartografía derivada tenemos las colecciones de mapas topográficos o temáticos que conocemos con el nombre de **atlas**. En el caso de que los mapas que los componen proporcionen información de base, diremos que son atlas generales; y si proporcionan información de un tema específico relativo a un área determinada, diremos que son atlas temáticos.

La procedencia de la información para la elaboración del atlas es muy variada: cartografía topográfica, fotografía aérea vertical, imagen de satélite, otra cartografía temática, bases de datos cartográficas, datos estadísticos, trabajo de campo, documentos bibliográficos, etc.

Dirección recomendada

Para ver ejemplos de cartografía de base (ortofotomapas y mapas topográficos) y temática podéis consultar la web del Hipermapa (*Atlas electrónico de Cataluña*) del Departamento de Política Territorial y Obras Públicas (DPTOP) de la Generalitat de Cataluña: <http://www10.gencat.net/ptop/AppJava/cat/actuacions/territori/hipermapa.jsp>.

Direcciones recomendadas

Para ver ejemplos en línea de cartografía derivada podéis consultar los siguientes enlaces:

- En el enlace <http://www.meteocat.com/pagines/atlesclim.html> podéis consultar información relativa al *Atlas climático de Cataluña* (ACC), que incluye información de termopluviometría y radiación solar.
- En el enlace <http://opengis.uab.es/wms/iberia/mms/index.htm> accedéis al *Atlas climático digital* de la Península Ibérica.
- En la web <http://plasma.nationalgeographic.com/mapmachine/index.html?theme=Temperature> tenéis datos mundiales de temperatura.

2.3. La escala de un mapa

Hasta ahora hemos visto los diferentes tipos de mapas que hay en función del tipo de información que se quiere mostrar. En este subapartado veremos otro factor esencial para seleccionar la información contenida en un mapa. Nos referimos a la escala del mapa.

La proporción entre los elementos representados en un mapa y la realidad es lo que se llama *escala*. El tamaño final del mapa, así como la precisión en la representación de los elementos, dependen de la selección de una escala apropiada.

En los siguientes subapartados se explicará en detalle el concepto de *escala*, las formas de representarla así como los conceptos de *precisión*, *resolución* y *grado de detalle* de los elementos representados en un mapa que dependen directamente de la escala seleccionada. La selección de la escala apropiada para un mapa es un factor importante a la hora de elaborar un mapa, como veremos en el subapartado 2.3.4.

2.3.1. Definición

Según el *Diccionario de la Lengua Española* (Real Academia Española), en términos generales la escala es una línea recta dividida en partes iguales que representan metros, kilómetros, leguas, etc., y sirve de medida para dibujar proporcionalmente en un mapa o plano las distancias y dimensiones.

Diccionario de la Lengua Española
(Real Academia Española):
<http://drae.rae.es>

En cartografía, la escala de un mapa es la relación constante entre una distancia medida sobre un mapa o plano y la distancia correspondiente medida sobre el terreno representado.

Normalmente se expresa la escala como una fracción o una proporción, por ejemplo, 1/10.000 o 1:10.000. Esta representación en forma de fracción de la escala significa que una unidad de medida en el mapa, por ejemplo 1 cm, representa 10.000 de la misma unidad en el terreno.

Ejemplo

Si la escala fuera 1:50.000, entonces 1 cm en el mapa representaría 50.000 cm, o 0,5 km, en el terreno.

El primer número siempre es 1 y representa la distancia en el mapa. El segundo número representa la distancia en el terreno y varía según la escala de representación.

Podemos expresar la definición de *escala* en forma de ecuación como:

$$\text{Escala} = \frac{\text{Distancia en el mapa}}{\text{Distancia en el terreno}} = \frac{1}{N} \quad (11)$$


Donde:

1: representa una unidad medida en el mapa,

N: representa N veces las mismas unidades medidas en el terreno.

Observaciones:

- Para calcular la **distancia real** hay que medir la distancia en el mapa y multiplicarla por la escala.
- Para calcular la **distancia en un mapa** correspondiente a una distancia real hay que dividir esta última por la escala.
- Dado que la escala se define como un cociente, siempre obtendremos los resultados en las mismas unidades en las que hagamos las mediciones.

Como el rango de escala es un cociente, es válida en cualquiera de las unidades en que se expresen los elementos de la fracción (eso sí, numerador y denominador corresponden a las mismas unidades). 

Fijaos en la tabla 2, donde se muestra la relación de 100 metros en el terreno con las distancias sobre un mapa en las escalas especificadas. Por ejemplo, en caso de que la escala sea 1:500, eso quiere decir que tenemos

$$\frac{1 \text{ m de distancia sobre el mapa}}{500 \text{ m de distancia sobre el terreno}}$$

entonces sólo tenemos que aplicar una sencilla regla de tres:

$$\frac{1}{500} = \frac{x}{100}$$

Entonces, $x = 100/500 = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$.

De la misma manera podéis comprobar el resto de relaciones.

Tabla 2. Relación de 100 metros en el terreno con las distancias sobre un mapa en diferentes escalas

Distancia en el mapa	Escala del mapa
20 cm	1:500
10 cm	1:1.000
5 cm	1:2.000
2 cm	1:5.000
1 cm	1:10.000
4 mm	1:25.000
2 mm	1:50.000
1 mm	1:100.000
0,4 mm	1:250.000
0,2 mm	1:500.000

2.3.2. Escala grande frente a escala pequeña

Uno de los conceptos más confusos para los nuevos usuarios de cartografía es el que hace referencia a los mapas de escala grande y mapas de escala pequeña.

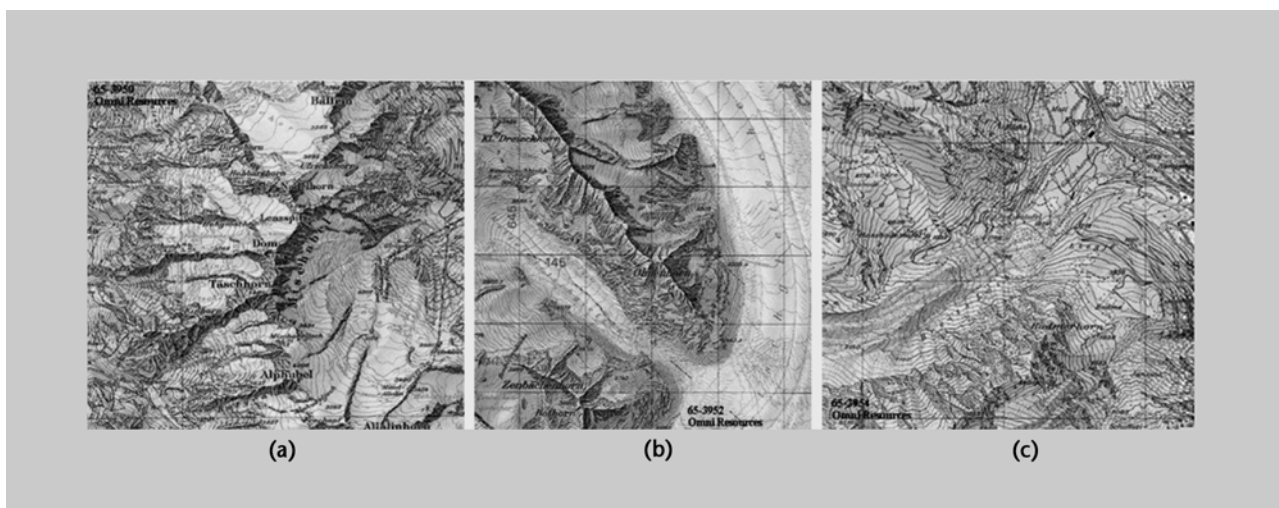
Cuanto mayor es una escala, más pequeño es el denominador de la fracción de la ecuación 11. Por ejemplo, un mapa a escala 1:50.000 se dice que tiene una escala mayor que un mapa a escala 1:250.000.

Los mapas de escalas grandes, en general, muestran más detalle que los mapas de escalas pequeñas porque en una escala grande hay más espacio en el mapa sobre el cual mostrar entidades. Los mapas de escala grande se utilizan generalmente para enseñar planos de lugares, áreas locales, barrios, ciudades, etc.

Los mapas de escalas pequeñas, en general, muestran menos detalle que los mapas de escala grande pero cubren porciones de terreno mayor. Son típicos de escalas pequeñas los mapas de extensión regional, nacional e internacional, como los 1:1.000.000. Los mapas de escala grande suelen ser más detallados que los de escala pequeña, ya que éstos no suelen ser suficientes para mostrar todos los detalles disponibles; así, entidades como ríos y carreteras a veces deben representarse como líneas simples, y entidades poligonales, como las ciudades, deben representarse como puntos.

En la figura 73 podéis ver un ejemplo de cartografía topográfica en diferentes escalas, en este caso correspondiente a la cartografía suiza. Concretamente se muestran mapas a escala 100.000 (figura 73a), 50.000 (figura 73b) y 25.000 (figura 73c). En estos mapas, podéis ver que a medida que aumenta la escala se muestran los detalles del terreno como, por ejemplo, las curvas de nivel o el ancho de los ríos. Fijaos también en la distribución y tipo de letra que se usa en cada caso para la **toponimia**: gruesa y muy espaciada en el caso del mapa a escala 1:100.000 y más fina y comprimida en el caso del mapa a escala (1:25.000).

Figura 73. Ejemplos de cartografía topográfica suiza



Escalas: a. 100.000. b. 50.000. c. 25.000
Fuente: <http://www.omnimap.com>

Dirección recomendada

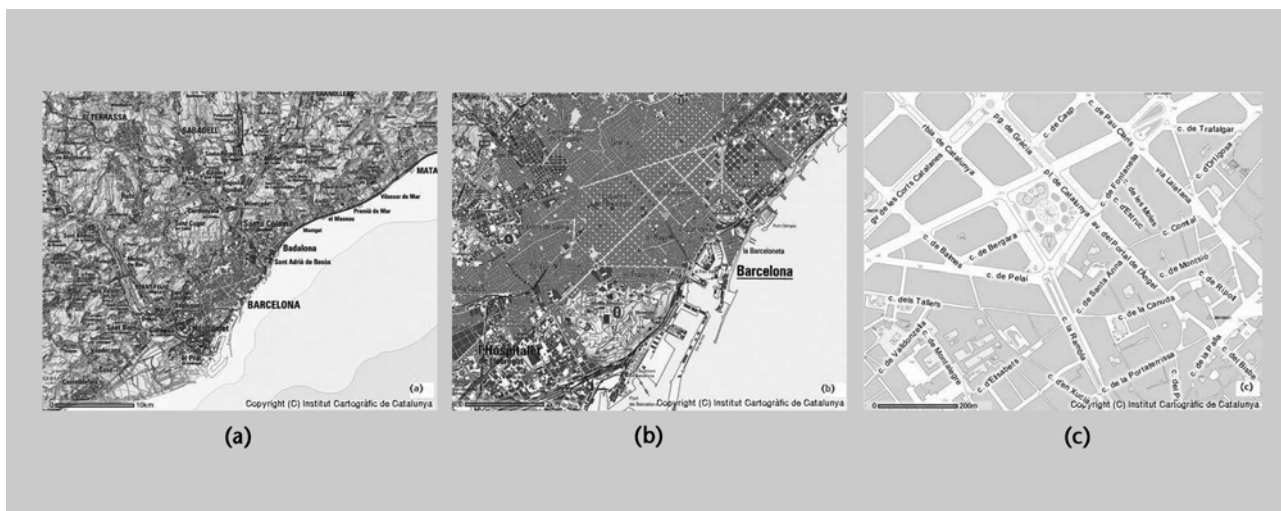
Para ver ejemplos en línea de la representación a diferentes escalas de la zona que seleccionéis de Cataluña, podéis consultar la web de movilidad del Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalitat de Cataluña en el siguiente enlace: http://mercuri.icc.cat/website/mob_nf/mob1/mob2/inici2.htm

Toponimia

La **toponimia** (*topos*, 'lugar', *ónoma*, 'nombre') de un mapa designa el conjunto de palabras que definen las diferentes entidades contenidas en el mapa.

En la figura 74 tenéis ejemplos de mapas de una misma zona de Barcelona (España) en diferentes escalas. Concretamente se muestra una zona del mapa topográfico de Cataluña a escala 250.000 (figura 74a), 50.000 (figura 74b) y 5.000 (figura 74c) que se ha obtenido consultando la web de movilidad del Departamento de Política Territorial y Obras Públicas (DPTOP) de la Generalitat de Cataluña.

Figura 74. Mapas topográficos de Cataluña del área de Barcelona



Escalas: a. 250.000. b. 50.000. c. 5.000

En la figura 74a podéis ver que la escala es muy pequeña y que las manzanas de casas del área metropolitana de Barcelona se representan como puntos, mientras que si lo comparamos con la figura 74b, donde la escala es un poco mayor, podemos ver que estas mismas manzanas se representan mediante polígonos, que en la figura 74c ya se ven claramente definidos con todos sus detalles.

Podéis observar, también, cómo en la figura 74a las vías de comunicación que más claramente se representan son las autopistas, que aparecen con cierto grosor, mientras que otras carreteras de orden inferior se representan sólo mediante líneas simples. Si os fijáis en la figura 74b, veréis que las carreteras que a escalas más pequeñas se representaban sólo con una línea aquí ya tienen cierto grosor como, por ejemplo, la C-31, que cruza L'Hospitalet de Llobregat en su entrada a Barcelona.

2.3.3. Representación de la escala gráfica y numérica

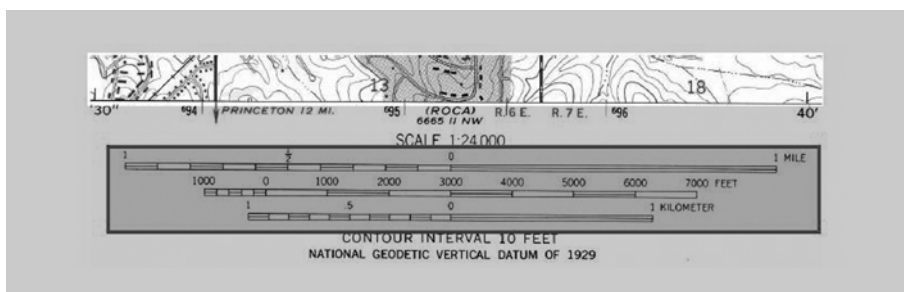
La escala **numérica** es la expresión de la escala como una proporción, por ejemplo: 1/50.000 ó 1:50.000, de la cual ya hemos hablado ampliamente en el subapartado 2.3.1.

Así, por ejemplo, si tenemos una escala 1:50.000 recordad que debemos multiplicar la longitud medida en el mapa por 50.000 para obtener la distancia sobre el terreno.

Los mapas normalmente muestran una escala **gráfica** para ayudar a determinar la distancia sobre el terreno sin necesidad de hacer cálculos. La escala gráfica es una línea que se divide en intervalos de igual longitud, donde cada intervalo representa una unidad determinada. Para usarla sólo hace falta medir la distancia sobre el mapa con una regla o un compás y transportar esta distancia a la escala gráfica para obtener la distancia real.

En la figura 75 tenéis un ejemplo de las diferentes escalas que aparecen en un mapa del USGS 1:24.000. La escala numérica es 1:24.000 y las escalas gráficas son las que aparecen dentro del rectángulo en la figura. Podéis ver que hay diferentes escalas gráficas en función de las unidades que representan (kilómetros, pies y millas) y cómo para cada una hay diferentes intervalos de medida.

Figura 75. Escalas numérica y gráfica en la leyenda de un mapa del USGS



Fuente: imagen adaptada del U. S. Geological Survey (USGS)

2.3.4. Selección de la escala

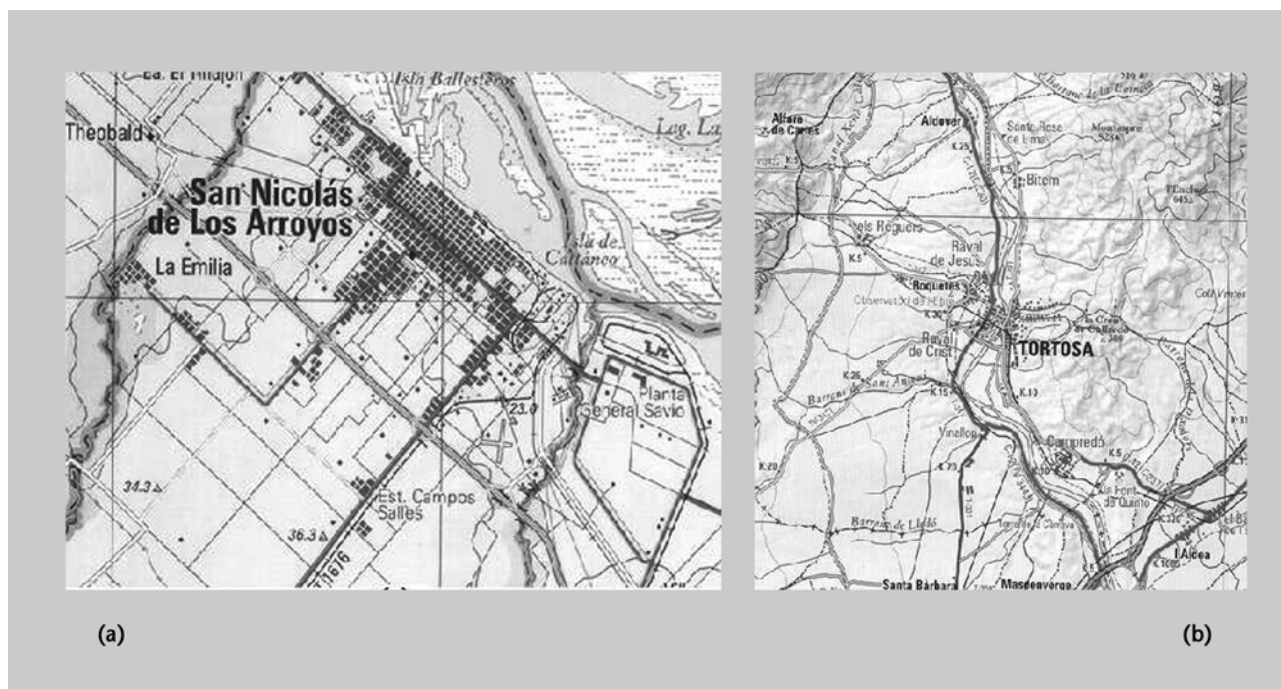
Una misma área se puede cartografiar en diferentes escalas. La selección de la escala, como otros parámetros que intervienen en el diseño de un mapa, depende de la finalidad del mapa y se decide teniendo en cuenta factores como la superficie que se va a cartografiar, el territorio, el contenido del mapa, la actualización, etc.

Las características naturales y humanas del territorio condicionan la selección de la escala y el diseño cartográfico.

Sobre el diseño cartográfico podéis ver el subapartado 2.4 de este módulo.

Podéis ver en la figura 76 cómo influye la densidad de población en la representación de dos mapas a escala 1:250.000, uno correspondiente a la República Argentina y el otro a España. Teniendo en cuenta que la escala de los dos mapas es la misma y, por lo tanto, muestran la misma cantidad de territorio, fijaos en que en la figura 72a se muestra sólo una parte de la ciudad, mientras que en la figura 72b podemos ver la ciudad y su entorno.

Figura 76. Mapas a escala 1:250.000



a. Carta topográfica de la República Argentina (elaborado por el ICC). b. Mapa topográfico de Cataluña (ICC)
Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

2.3.5. Aspectos relacionados con la escala: detalle, precisión y resolución

La selección de la escala de un mapa determina el grado de detalle de los elementos que se representan en él, así como la resolución y la precisión de éstos.

A continuación vamos a definir y explicar cada uno de estos conceptos:

1) Grado de detalle del mapa

El nivel de detalle de un mapa hace referencia a la cantidad de información geográfica que se representa. No debe confundirse este término con *precisión*, que se refiere a la calidad de la información.

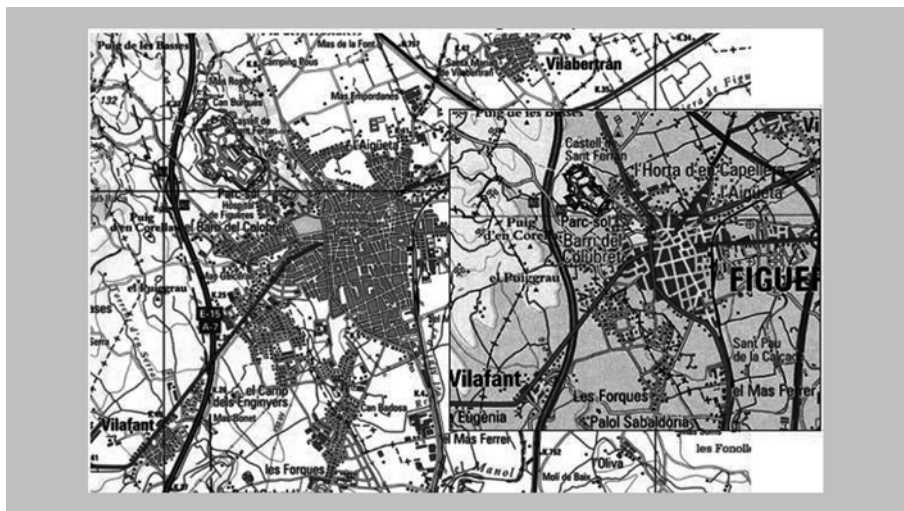
Ya hemos hablado en el subapartado 2.3.2 del hecho de que los mapas de escala grande muestran mayor detalle que los mapas de escala pequeña. El proceso de simplificación de las entidades en los mapas de escala pequeña se llama *generalización*, de manera que entidades como ríos y carreteras se representan mediante líneas simples.

Ejemplo

Podéis ver un ejemplo de ello en la figura 77, donde se muestra la generalización de las entidades de un mapa de escala 1:50.000 a escala 1:100.000.

Fijaos, por ejemplo, en los núcleos de población, concretamente en el de Figueras, para ver cómo a escala 50.000 las manzanas de casas se representan mediante polígonos separados por calles o vías de comunicación y cómo a escala 100.000 estas entidades se generalizan en un único polígono sobre el cual se representan de manera esquemática las principales vías de comunicación intentando mantener la forma genérica del municipio.

Figura 77. Generalización de escala 50.000 a 100.000



Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

Cuando se generalizan entidades, se reduce el nivel de detalle para evitar aglomeraciones en el mapa, aunque se mantiene la forma genérica y la posición.

Por ejemplo, un mapa de la línea de costa a pequeña escala no representará todas las calas que se verían en un mapa a gran escala. En pequeñas escalas se puede llegar a eliminar totalmente determinadas entidades.

2) Resolución del mapa

La resolución del mapa se define como el tamaño de la entidad más pequeña que se puede representar en la superficie. Se puede entender como la capacidad para distinguir entre objetos separados próximos entre sí.

3) Precisión del mapa

La precisión del mapa no depende de su escala. La precisión depende de los datos geográficos utilizados para generar el mapa, con qué exactitud se han transferido los datos originales al mapa, y la resolución a la que el mapa se imprime o visualiza.

Tened en cuenta que, cuanto más pequeña es la escala de un mapa, una unidad de distancia representa una distancia mayor sobre el terreno. De esta manera, si una de las entidades mostradas en un mapa de escala muy pequeña se aleja sólo un milímetro de su posición real, la imprecisión de la medida sobre el terreno es enorme.

2.4. Diseño Cartográfico

Hasta ahora hemos visto cómo son los mapas y qué características y elementos podemos encontrar en ellos. Pero ¿cómo se elabora un mapa? ¿Qué proceso se sigue?

La cartografía como medio de comunicación se basa en ciertas normas o directrices para poder representar la realidad de manera clara y efectiva en un mapa. Aun así, las características naturales y humanas del territorio son las que finalmente condicionan el diseño cartográfico de manera conjunta con el estilo del cartógrafo.

La definición y diseño de un proyecto cartográfico es la etapa inicial de lo que se llama *flujo o proceso cartográfico*, cuyo ámbito global se escapa al propósito de este módulo. En este apartado se describirán los fundamentos básicos del diseño de los mapas para usar un SIG de manera más eficiente.

El mapa, como documento técnico y comunicativo, tiene unas propiedades métricas y comunicativas que deben tenerse en cuenta en su diseño. Entre las propiedades métricas exigiremos:

- fidelidad geométrica,
- errores menores en la tolerancia exigida en la escala del mapa,
- simbolización.

Con respecto a las propiedades comunicativas:

- lectura fácil y rápida de la información,
- jerarquía de la información,
- utilización de un lenguaje visual adecuado.

Para garantizar estas propiedades, a continuación describiremos las dos etapas básicas que exigen la definición y diseño de un nuevo proyecto cartográfico: la definición del objetivo del mapa y la selección del método de elaboración.

2.4.1. Definición del objetivo y funcionalidad del mapa

En función del tipo de documento (mapa base, temático o derivado), que ya hemos visto en el subapartado 2.2, se escogerán las siguientes características:

1) La **escala**, que determina qué elementos son los que se van a representar en el mapa. Así, por ejemplo, un río de un ancho de 2 m, a escala 1:5.000 lo representaremos como una línea por el eje, mientras que a escala 1:1.000 representaríamos ambos márgenes.

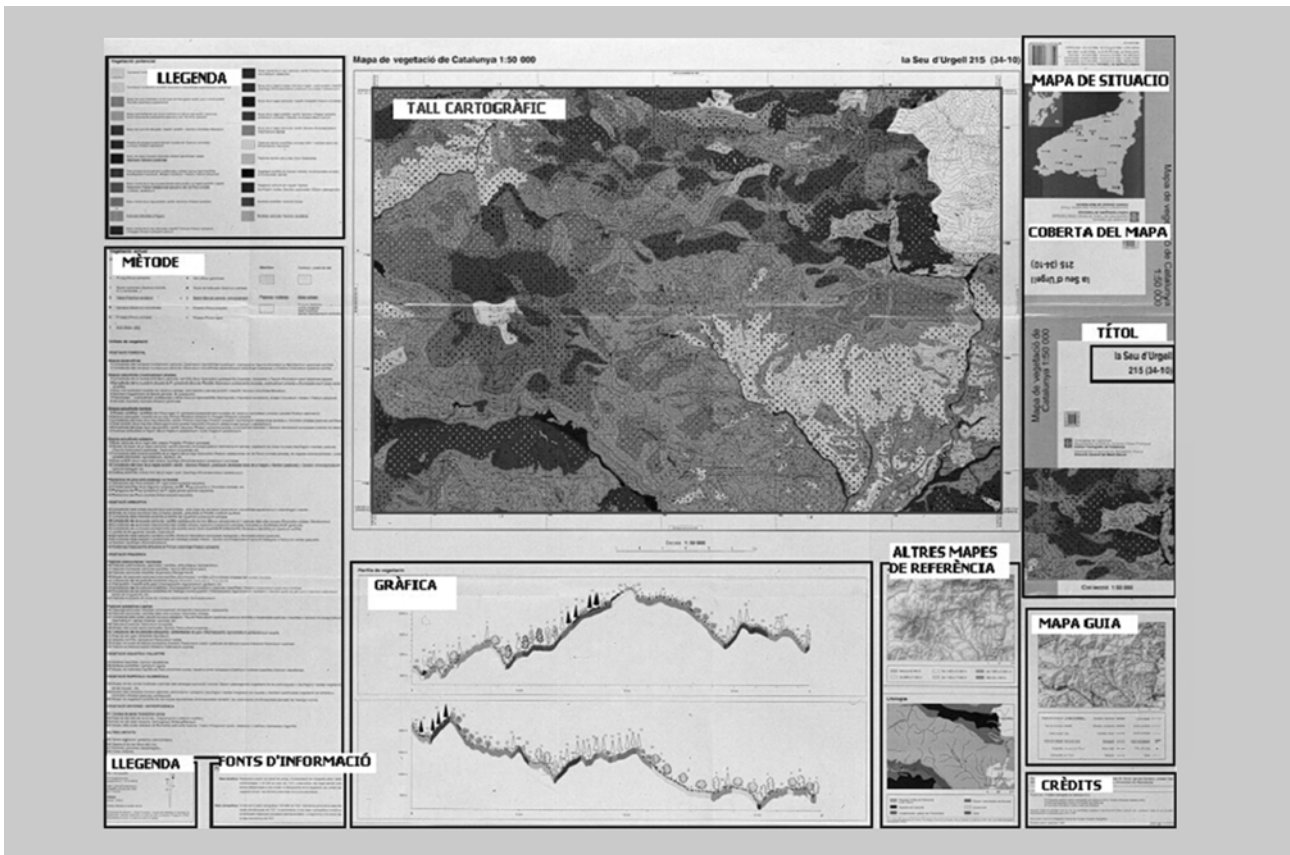
2) El **marco cartográfico**, que define el área cartografiada o representada en el mapa.

3) El **soporte y formato de salida**, que puede ser digital o impreso. En este último caso habrá que definir el tipo y el formato del papel.

4) El **contenido y componentes de un mapa**, que consta del corte cartográfico y de los elementos periféricos. En la figura 78 se muestra un mapa temático, en concreto un mapa de vegetación de Cataluña 1:50.000 producido por

el ICC, donde podéis ver los diferentes componentes de un mapa que se relacionan a continuación:

Figura 78. Detalle de algunos de los elementos periféricos y del contenido correspondientes a un mapa de la serie de mapas de vegetación de Cataluña 1:50.000



Fuente: elaboración propia a partir de mapa del ICC

a) El **corte cartográfico**: comprende el contenido del mapa, que puede ser básico o temático.

Como contenido básico del mapa, podemos encontrar:

- la altimetría y las sombras del terreno,
- la planimetría,
- la toponimia,
- los límites administrativos,
- los vértices geodésicos.

Con respecto al contenido temático, encontraremos:

- elementos especiales como iconos o pictogramas específicos según la temática del mapa,
- base temática.

b) Los **elementos periféricos**: se refieren a toda la información que encontramos en un mapa y que no está dentro del corte cartográfico, como por ejemplo:

- el título y la cubierta del mapa,
- los créditos, textos y datos,

Altimetría

La altimetría de un mapa hace referencia a los elementos representativos de la altura, como pueden ser las curvas de nivel, las cotas y las sombras del terreno.

Planimetría

La planimetría de un mapa comprende todos los detalles del terreno representados sobre una superficie plana prescindiendo de su relieve.

Mapa guía

El mapa guía que puede encontrarse en la carátula de un mapa normalmente muestra la ubicación del corte cartográfico dentro de una extensión mayor de territorio para tener una referencia global.

- la leyenda,
- los marcos y las coordenadas,
- los mapas guía y los gráficos.

2.4.2. Selección del método de elaboración

Para seleccionar el método que utilizaremos en el desarrollo del proyecto deberá tenerse en cuenta la normativa cartográfica, las fuentes de información de las que se dispone y el proceso de elaboración. A continuación vamos a describir cada uno de estos aspectos.

La normativa cartográfica

La normativa cartográfica puede estar basada en estándares establecidos por organismos internacionales como la Asociación Cartográfica Internacional (ICA) –ved el subapartado 2.2– o bien seguir las directrices de escuelas cartográficas como la suiza, la alemana o la holandesa. Estos estándares y normas pueden usarse conjuntamente con el estilo propio del organismo que produce el mapa.

Por ejemplo, habrá que tener en cuenta elementos tales como los umbrales mínimos de percepción visual de los objetos que componen un mapa, la densidad y la jerarquización de la información, la separación mínima entre dos elementos gráficos, la respuesta emocional al color, etc.

Fuentes de información

Las fuentes de información se clasifican en primarias y elaboradas. Las fuentes de datos primarios son aquellas que se recogen exclusivamente para un propósito específico como puede ser la elaboración de un mapa; y las elaboradas son aquellas que se han obtenido a partir de datos ya existentes, a las que hemos aplicado algún tipo de modificación. Veamos, pues, cada uno de estos tipos:

- **Las fuentes de datos primarios:** se obtienen principalmente a partir del trabajo de campo y la fotointerpretación de ortofotomapas digitales. Posteriormente, se realiza el análisis, la selección y la clasificación de estos datos en lo que se llama *trabajo de gabinete*. Esta selección y clasificación es lo que permite dar intencionalidad al mapa, especialmente en cartografía temática. En la tabla 3 detallamos los tipos de datos obtenidos en cada caso.

Tabla 3

Fuente	Tipos de datos que obtenemos
Trabajo de campo	1. Elementos específicos: toponimia, puntos de apoyo, límites territoriales, etc. 2. Variables temáticas: geología, usos del suelo, etc.
Fotografía aérea vertical	1. Planimetría 2. Actualización puntual de elementos planimétricos
Ortofotos/ortoimágenes	1. Planimetría 2. Variables temáticas

- Las **fuentes de datos elaborados**: se obtienen por ejemplo, con el aprovechamiento de bases cartográficas existentes, mediante procesos de selección y recodificación para la generación de una nueva versión; o bien con la modificación de un mapa topográfico para la generación de un mapa temático o derivado mediante la actualización y generalización de los datos originales. En la tabla 4 se muestran algunas de las fuentes de este tipo.

Tabla 4

Fuente	Tipos de datos que obtenemos
Cartografía	1. Impresa/digital 2. Bases cartográficas numéricas 3. Explotación de sistemas de información geográfica
Bases alfanuméricas	1. Estadísticas (demográficas, climáticas, etc.) 2. Listados
Fuentes documentales	1. Bibliografía: clasificación de elementos, toponimia, etc. 2. Expedientes de delimitación: límites municipales, etc.
Organismos, entidades	1. Dirección General de Carreteras (DGC): códigos, clasificación y proyectos de carreteras 2. Departamento de Medio Ambiente (DMA): límites, nombres y clasificación de espacios protegidos

Proceso de elaboración del proyecto cartográfico

El proceso de elaboración del proyecto cartográfico comienza una vez que hemos definido el propósito del mapa y tenemos las fuentes de información con las que vamos a trabajar. Consta de una serie de procesos que se conocen con el nombre de *generalización*.

La **generalización** es un proceso de abstracción cartográfica en el cual el autor transforma los datos de manera que se puedan representar en un mapa y de manera que el usuario entienda el mapa.

El objetivo de la **generalización cartográfica** es el de producir un mapa o una base cartográfica numérica claramente legible e interpretable, a partir de una información que se considera demasiado abundante y detallada para la escala de representación.

Normalmente se aplica para la obtención de una base o de un mapa a partir de otras bases o mapas de escalas mayores.

La generalización se compone de los siguientes procesos:

- 1) **Selección**. Proceso que define qué elementos se mostrarán en el mapa y cuáles se eliminarán intencionadamente en función del propósito del mapa.
- 2) **Clasificación**. Proceso que agrupa los elementos del mapa según la intencionalidad y el mensaje que se quiere transmitir y con objeto de facilitar la lec-

Direcciones recomendadas

Podéis consultar la diferente simbolización utilizada en los siguientes proyectos:

Mapa topográfico de Cat. 1:5.000:

http://mercuri.icc.cat/website/mob_nf/mob1/mob2/images_mob/llegenda_topo5.jpg

Mapa topográfico de Cat. 1:50.000:

http://mercuri.icc.cat/website/mob_nf/mob1/mob2/images_mob/llegenda_topo50.jpg

Mapa topográfico de Cat. 1:250.000:

http://mercuri.icc.cat/website/mob_nf/mob1/mob2/images_mob/llegenda_topo250.jpg

Topographic Map Symbols USGS:

<http://erg.usgs.gov/isb/pubs/booklets/symbols>

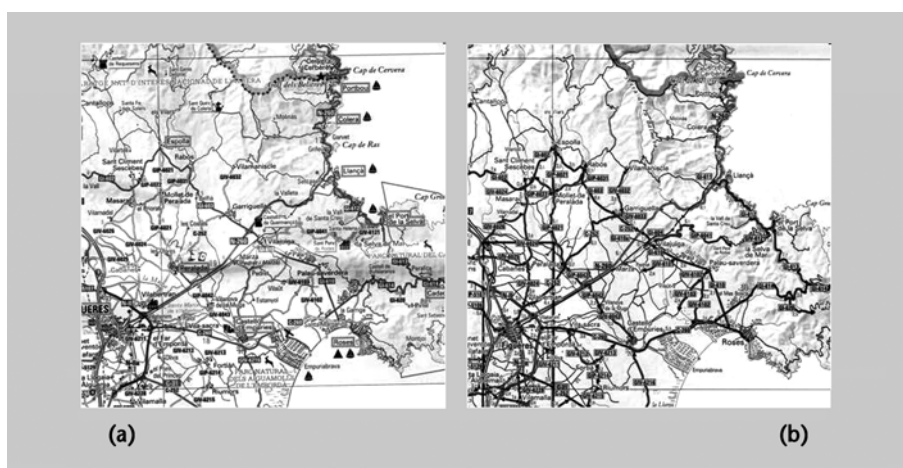
tura. Todo objeto representado deberá estar contenido dentro de una de las clases definidas.

3) **Simplificación.** Proceso que elimina los detalles innecesarios de los objetos según la escala de representación.

4) **Simbolización.** Proceso de representación convencional de un objeto o una idea.

En la figura 79 podéis ver cómo la simbolización de la misma información puede generar diferentes productos cartográficos. En particular, se muestran dos mapas de carreteras a E 1:250.000 simbolizados de diferente manera.

Figura 79. Ejemplo de simbolización diferente de la misma información para generar dos productos diferentes



a. Mapa de carreteras 1:250.000 de tipo turístico. b. Mapa oficial de carreteras 1:250.000
Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

Por una parte, la imagen 79a corresponde a un mapa de tipo turístico donde se pueden ver los pictogramas de localizaciones turísticas y la rotulación de la toponimia propia de este tipo de mapa; por otra, la imagen 79b muestra la información simbolizada según la descripción oficial para elaborar el mapa oficial de carreteras de Cataluña 1:250.000.

2.5. La tercera dimensión: la altitud

Ya hemos visto que un mapa es un modelo a escala de la realidad, que representa una porción de la superficie terrestre en dos dimensiones. Lo que no hemos comentado todavía son los tipos de elementos que podemos encontrar, que en términos generales son los que se indican a continuación:

1) Elementos **planimétricos**, que representan la información relativa a la actividad humana (usos del suelo, distribución de poblaciones, vías de comunicación, etc.) e información natural (red hidrográfica y vegetación natural).

2) Elementos **toponímicos**, que se representan con los nombres contenidos en un mapa. Constituyen una prueba del paso de diferentes civilizaciones y de la evolución a lo largo del tiempo.

3) Elementos **altimétricos**, que representan el relieve mediante curvas de nivel, cotas y sombreado. Los mapas topográficos contienen este tipo de información, además de la información planimétrica y la toponimia.

De todos estos elementos, lo que presenta más dificultad para representar sobre una superficie plana es el relieve. En los siguientes subapartados se describirán los métodos más comunes para la representación del relieve, la medición de altitudes, el cálculo de pendientes y la construcción de perfiles topográficos.

Sombreado del terreno

El sombreado del terreno es la técnica que se usa para realzar el aspecto de la representación del terreno por medio de la adición de la luz para dar sensación de volumen.

2.5.1. Representación altimétrica: curvas de nivel, sombreado del terreno y cotas

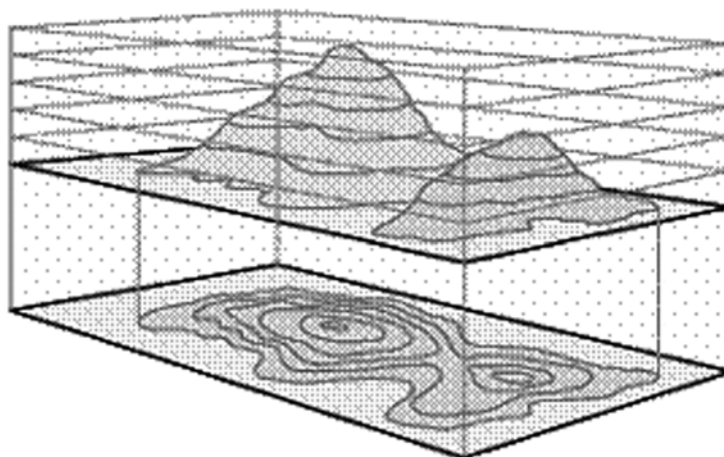
La representación del relieve del terreno se llama orografía. Para describir las formas del relieve se usan diferentes elementos como son las curvas de nivel, el sombreado del terreno y las cotas en puntos significativos. Ahora vamos a ver cada uno de estos elementos.

Curvas de nivel

Las curvas de nivel son líneas imaginarias que unen los puntos del terreno que se encuentran a la misma altitud sobre el nivel del mar.

En la figura 80 podéis ver que, si pudiéramos serrar horizontalmente el terreno en rebanadas cada 5 ó 10 metros, el perímetro de cada una de estas secciones del terreno correspondería a una curva de nivel.

Figura 80. Esquema de la generación de las curvas de nivel de un terreno



Las características de las curvas de nivel son las siguientes: !

- Las curvas de nivel no se cortan ni se bifurcan y tampoco coinciden, excepto en cornisas y acantilados. En estos dos últimos casos, por la misma morfología del terreno se puede dar que coincidan las curvas correspondientes a la parte superior y la de la parte inferior por la verticalidad del relieve.
- Todas las curvas son cerradas, aunque no se represente en el mapa por el corte seleccionado.
- La dirección de máxima pendiente del terreno forma ángulo recto con la curva de nivel.
- Las alturas de curvas sucesivas son números uniformemente crecientes o decrecientes.

Entre dos curvas de nivel consecutivas siempre está representada la misma altura, que llamamos *intervalo de curva* o **equidistancia** y que se define en función de la escala del mapa.

Normalmente, en un mapa 1:50.000 la equidistancia es de 20 metros. Cada cuatro curvas, es decir, cada 100 metros, la curva de nivel se dibuja más gruesa y recibe el nombre de **curva maestra** (en inglés, *index contour*). Las curvas maestras llevan asociado un número que indica su altura sobre el nivel del mar.

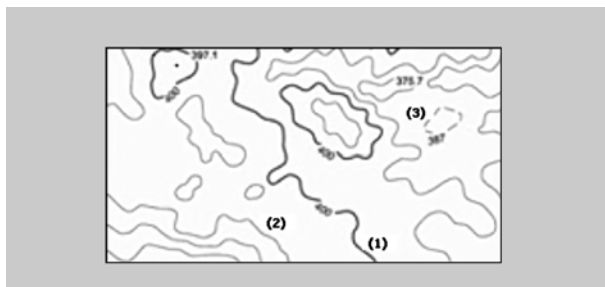
El resto de **curvas** reciben el nombre de **sencillas**. Se dibujan con un trazado continuado de color marrón, aunque también aparecen de color azul en zonas de hielo (glaciares) y de color negro si se trata de terreno rocoso.

A veces también os podréis encontrar con unas curvas dibujadas con un trazo discontinuo. Éstas son **curvas auxiliares**, que no aparecen siempre y dan información sobre la forma del terreno que se encuentra entre dos curvas convencionales.

Ejemplo de curvas de nivel

En la figura 81 podéis ver los diferentes tipos de curvas de nivel que acabamos de describir. Fijaos en cómo el trazo de las curvas maestras es más grueso que el de los otros tipos de curvas y cómo van numeradas. Las curvas sencillas aparecen en el mismo color que las maestras pero con un trazo más fino y no llevan numeración porque son equidistantes entre dos curvas de nivel maestras. Finalmente, podéis ver una curva auxiliar, dibujada con un trazo discontinuo, y que indica el valor de las cotas dado que no es equiespaciada como las curvas sencillas.

Figura 81. Tipos de curvas de nivel



1. Curva maestra. 2. Curva sencilla. 3. Curva auxiliar.
Fuente: elaboración propia

Dado que entre dos curvas de nivel la distancia es siempre la misma, su representación en el mapa nos permite ver la configuración del terreno a partir de los siguientes supuestos:

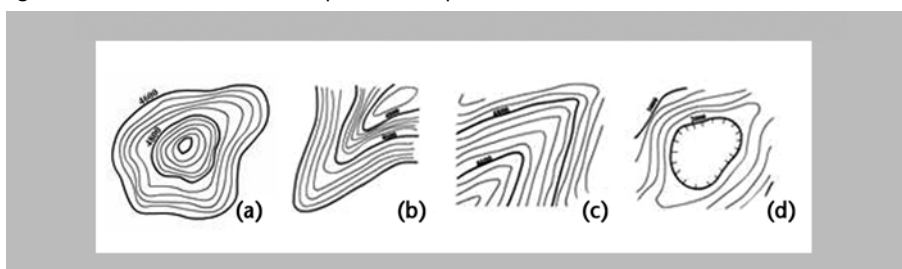
- Dos curvas que en un mapa se encuentran muy juntas indican una pendiente fuerte, ya que la distancia horizontal es poca comparada con la vertical o, dicho de otra manera, en poco espacio horizontal la altitud sube muy rápidamente.
- Dos curvas que en un mapa se encuentran muy separadas indican una pendiente suave e incluso un llano, ya que la distancia horizontal es grande comparada que la vertical o, dicho de otra manera, hace falta mucho espacio horizontal para subir de cota.
- Una curva cerrada, que no contiene ninguna otra curva, indica una cima, y a menudo se indica su altura máxima, o al menos un punto que se encuentra a una altura superior a la zona que lo rodea. Si esta curva rodea un espacio muy grande, puede indicar una pequeña meseta.
- La uniformidad en la separación de las curvas indica una pendiente regular, así como las que están separadas de forma desigual indican un pendiente irregular.

En resumen:

- Si las curvas de nivel están muy separadas, el terreno es llano.
- Si están próximas, indican una pendiente.
- Si están cerradas en círculo, señalan un cerro.
- Si aparecen varias curvas cerradas en círculos, delimitados a su alrededor por otras curvas en círculos mayores, nos indican una sierra.
- A veces encontraremos curvas de nivel con unas pequeñas pestañas. Eso nos indica que en ese punto hay una pequeña depresión. La depresión está en la dirección que marcan las pestañas.

En la figura 82 podéis ver algunas figuras típicas que corresponden a elementos del paisaje como son las colinas (figura 82a), las crestas (figura 82b), los valles (figura 82c) y las depresiones (figura 82d).

Figura 82. Elementos del relieve representados por curvas de nivel



a. Cima. b. Cresta. c. Valle. d. Depresión.
Fuente: elaboración propia

Observación

Supongamos que en un mapa las curvas de nivel están equiespaciadas cada 100 m y en el terreno tenemos un barranco de 70 m. En el caso de que el mapa muestre un terreno muy plano, este barranco no aparecería, ya que quedaría entre dos curvas de nivel. En estos supuestos hay que utilizar otros elementos para describir las formas del relieve, como las cotas altimétricas o las sombras del terreno.

Sombreado del terreno

El sombreado del terreno (en inglés, *shading*) es la técnica que se usa para realzar el aspecto de la representación del terreno por medio de la adición de la luz y dar así la sensación de volumen, para percibir mejor la forma del terreno. Normalmente se sitúa un foco de luz en el noroeste a unos 30° o 45° sobre la horizontal, para proyectar la sombra hacia el sureste.

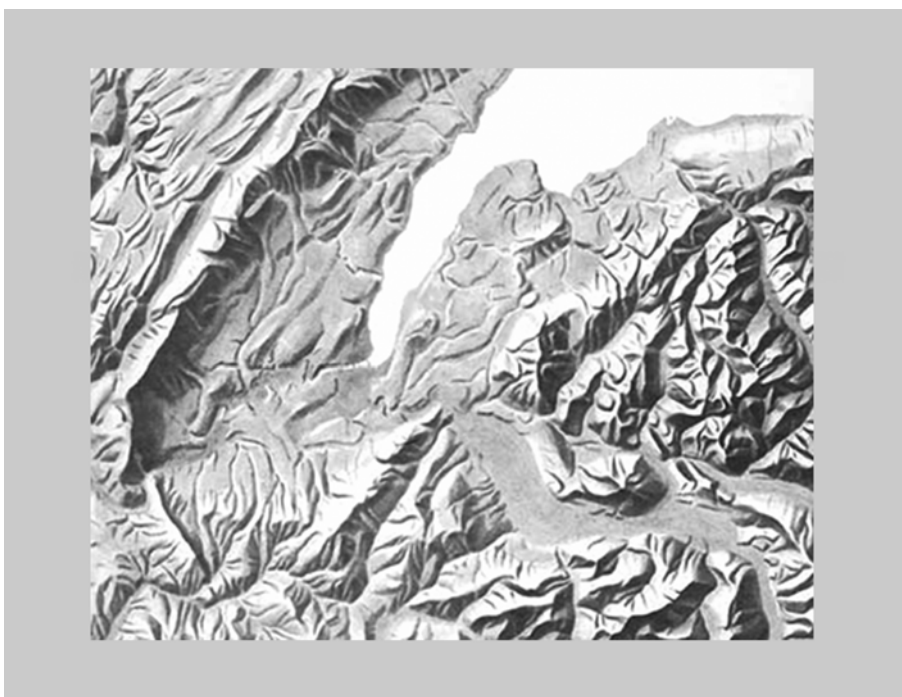
Dirección recomendada

Para ver ejemplos del efecto del sombreado del terreno, podéis consultar el siguiente enlace: <http://www.reliefshading.com>.

Ejemplo de relieve sombreado

En la figura 83 tenéis un ejemplo de mapa a escala 1:300.000 que muestra el relieve sombreado correspondiente al cantón de Ginebra (Suiza). Fijaos en que las partes más oscuras de la imagen, correspondientes a la sombra, están orientadas hacia el sureste, dado que el foco de luz está situado en el noroeste en un punto situado a 135° de longitud y 45° de elevación. En la imagen se puede identificar el lago Léman, que aparece en blanco, sin ningún tipo de sombra, y en la parte derecha está representado el terreno escarpado de las Dolomitas.

Figura 83. Relieve sombreado del lado de Ginebra (Suiza) en E 1:300.000



Fuente: <http://www.reliefshading.com>

Cotas

En los mapas topográficos hay otro tipo de información que nos muestra la altura del terreno. Se trata de la representación de puntos de altura conocidos como pueden ser las cimas de las montañas, los vértices geodésicos, los campanarios de las iglesias, los ayuntamientos, etc.

Se suelen representar con un punto y un número, donde el punto se llama **cota** (en inglés, *spot elevation*) y el número es la altitud del punto sobre el nivel del mar. En el caso de España, las cotas están referidas al nivel medio del mar en Alicante (por lo tanto, el mar en Alicante tiene altitud cero, por definición).

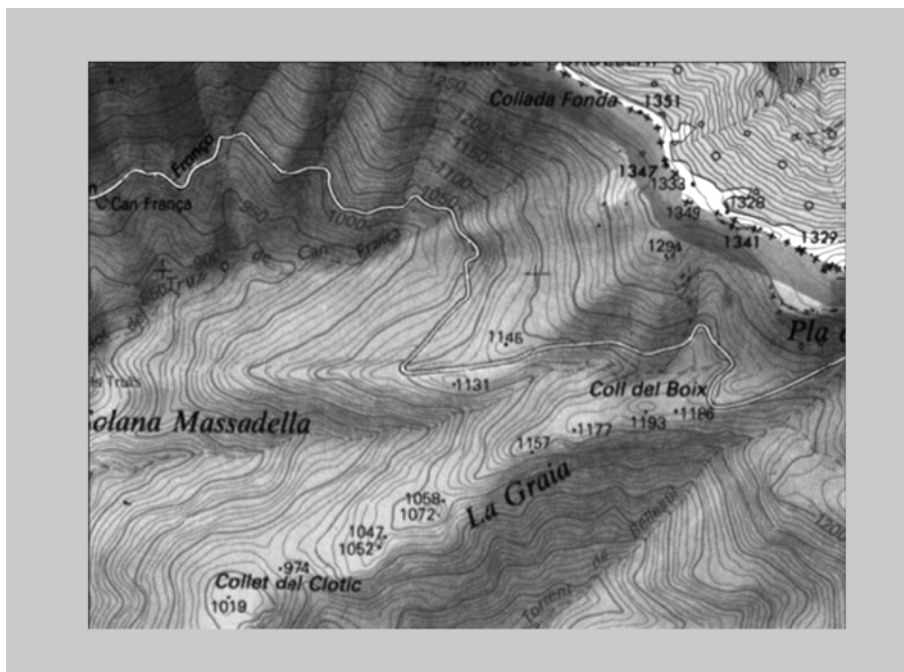
Las cotas deben cumplir las siguientes características:

- Servir de ayuda a la lectura de las curvas de nivel.
- Definir las partes no representadas por las curvas a causa de la equidistancia, por ejemplo, picos, cuencas y cambios de pendiente.
- Servir como punto de origen para operaciones altimétricas en el trabajo de campo.

Ejemplo de cotas

En la figura 84 se muestra un trozo de la hoja *Massif du Canigou* (Macizo del Canigó) correspondiente a la serie de mapas topográficos E 1:25.000 que publica el Institut Géographique National (IGN-fr, Instituto Geográfico Nacional de Francia). Fijaos en cómo las cotas altimétricas marcan cimas, como en el caso del pequeño collado del Clotic, y en cómo desde este punto hasta el collado del Boix hay una serie de cotas que van marcando el perfil de una cresta. El hecho de que es una cresta también queda patente en el sombreado del terreno, que ya hemos comentado en el subapartado anterior.

Figura 84. Ejemplo de las cotas altimétricas en un mapa topográfico en E 1:25:000



Fuente: Institut Géographique National (IGN-fr) (<http://www.ign.fr>)

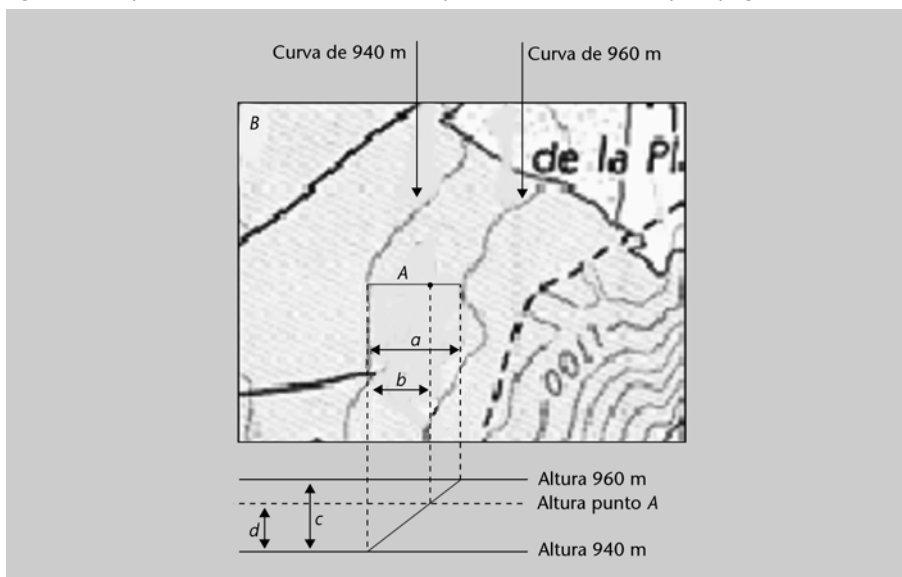
2.5.2. Medición de alturas sobre un mapa: interpolación de curvas de nivel

Las curvas de nivel y las cotas, que acabamos de describir en el subapartado anterior, nos permiten determinar la altura de un punto por aproximación suponiendo que la pendiente es localmente uniforme.

Calculemos la altura aproximada del punto A que aparece en la figura 85. En esta figura se muestra un trozo de mapa topográfico donde se ven dos curvas de nivel entre las que se sitúa el punto A. Para determinar la altura de estas curvas sólo hay que mirar la información que nos da el mapa. Supongamos que una de las curvas representa los puntos con altura de 960 m y la otra los puntos con altura de 940 m.

La diferencia de altura entre el punto A y las dos curvas, que llamamos c y d , es proporcional a la distancia del punto a cada una de las curvas que marcamos como a y b .

Figura 85. Esquema del cálculo de una altura aproximada sobre un mapa topográfico



Fuente: elaboración propia

Esta relación de proporcionalidad se expresa con la siguiente ecuación:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad (12)$$

Donde:

- a = distancia en el mapa entre las dos curvas,
- b = distancia del punto A a la curva de 940 m,
- c = diferencia de altura entre las dos curvas (equidistancia): 20 m,
- d = diferencia de altura del punto A y la curva de 940 m.

Entonces tenemos que la altura del punto $A = 940 \text{ m} + d = 940 \text{ m} + 20 \cdot (b/a)$.

Fijaos en que la distancia b/a se puede medir sobre el mapa.

2.5.3. Cálculo de la pendiente de un terreno

La pendiente de un terreno es la relación que hay entre el desnivel que debemos superar y la distancia en horizontal que debemos recorrer.

La pendiente se puede expresar directamente como un ángulo en grados, o bien como el tanto por ciento de inclinación del eje Y sobre el eje X . A continuación se explica cada uno de estos conceptos:

1) Expresión de la pendiente en grados

Nombramos con el símbolo θ al ángulo de inclinación que forma la pendiente. Para calcular este ángulo, correspondiente a la pendiente en grados, sólo hay que resolver la siguiente relación trigonométrica correspondiente a un triángulo rectángulo de lados conocidos:

$$\text{tangente } \theta = \frac{\text{altura de } Y}{\text{longitud en } X} \quad (13)$$

Recordad que la tangente de un ángulo α se define como:

$$\text{tangente } \alpha = \frac{\text{seno } \alpha}{\text{coseno } \alpha}$$

2) Expresión de la pendiente en tanto por ciento (%)

Para calcular la pendiente en tanto por ciento (%) sólo hay que resolver la siguiente regla de tres: distancia en horizontal es a 100 lo que distancia en vertical es a X. Es decir:

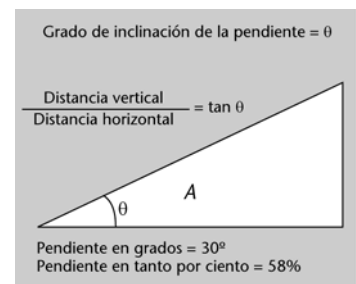
$$\% \text{ de la pendiente} = \frac{\text{distancia vertical} \cdot 100}{\text{distancia horizontal}}$$

Dado que la distancia vertical es la altura de Y y la horizontal la longitud en X, tenemos:

$$\% \text{ pendiente} = \text{tangente } \theta \cdot 100 \quad (14)$$

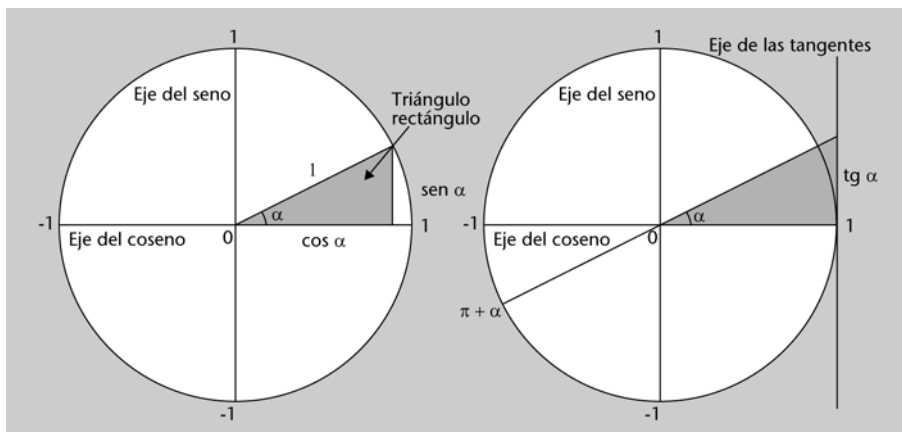
En la figura 86 tenéis la expresión gráfica de la definición de la tangente de un ángulo α , donde se puede ver que el ángulo de la pendiente va de 0° a 90° y que, a medida que se acerca a 90° , el tanto por ciento se aproxima al infinito. Un ángulo de 45° es una pendiente del 100%, ya que cada 100 m en horizontal se recorren 100 m en altura y un ángulo de inclinación del terreno de 30° representa una pendiente del 58%, tal como podéis ver en la figura 87.

Figura 86. Ejemplo de pendiente expresada en grados y en tanto por ciento



Fuente: elaboración propia

Figura 87. Descripción gráfica de la función trigonométrica tangente

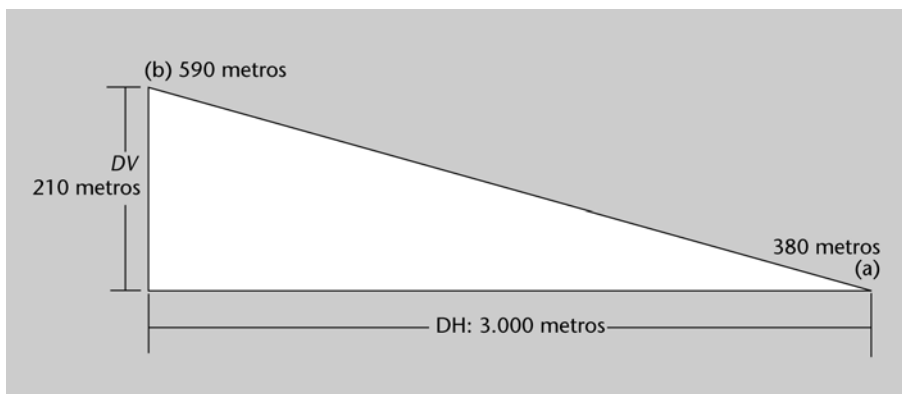


Fuente: elaboración propia

Ejemplo de cálculo de la pendiente

Pondremos un ejemplo para ilustrar el cálculo de la pendiente y expresarlo en cualquiera de las formas que se han descrito. Fijaos en la figura 88, donde se muestran los datos necesarios para el cálculo: dos puntos sobre el terreno con alturas de 380 m y de 590 m; con una distancia horizontal (DH) de 3.000 m y una distancia vertical (DV) de 210 m.

Figura 88. Ejemplo de cálculo de la pendiente de dos puntos dados



Fuente: elaboración propia

Recordemos que la altura de los puntos se obtiene o bien porque son puntos de cota conocida o bien por aproximación interpolando entre las curvas de nivel, tal como se ha explicado en el subapartado 2.5.2.

1) Expresión de la pendiente en grados

Para determinar el grado de inclinación de la pendiente θ , hay que calcular la distancia vertical y la distancia horizontal entre estos dos puntos. Supongamos que la distancia horizontal es de 3.000 m, medida sobre el mapa (teniendo en cuenta la escala).

Distancia horizontal (DH) = 3.000 m

Distancia vertical (DV) = 210 m

Entonces, $\tan\theta = DV/DH = 0,07$ y, por lo $\tan\theta = \arctan(0,07) = 4^\circ$

2) Expresión de la pendiente en tanto por ciento (%)

Para determinar el porcentaje de inclinación del terreno sabemos que debemos calcular $(DV/DH) \cdot 100$, que es 7%.

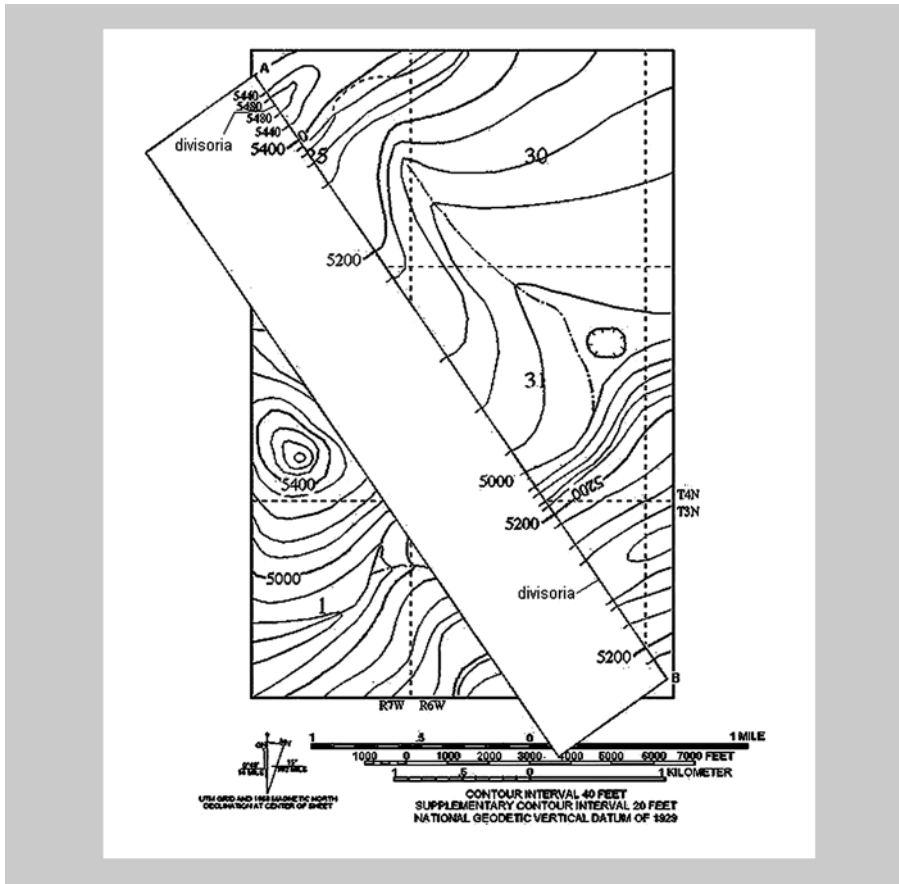
2.5.4. Perfil topográfico

El análisis del relieve se complementa con la elaboración de un perfil topográfico. Un perfil topográfico es un corte vertical del relieve en una dirección determinada, generalmente transversal a un valle. Este corte nos da una idea clara de las pendientes de las montañas y es de fácil construcción. Para levantarlo, hay que considerar la información que nos proporciona el mapa topográfico: las curvas de nivel, la distancia horizontal entre dos puntos y la escala. Además, tened en cuenta que los perfiles, como los mapas, deben hacerse a escala.

A continuación vamos a detallar los pasos tradicionales para hacer un perfil topográfico entre dos puntos, A y B , tal como muestra la figura 89 (de todos modos, con las herramientas informáticas actuales, para dibujar un perfil

sólo hemos de dibujar en un ordenador una línea sobre un mapa y el programa hace el resto):

Figura 89. Selección de la zona para la construcción de un perfil topográfico

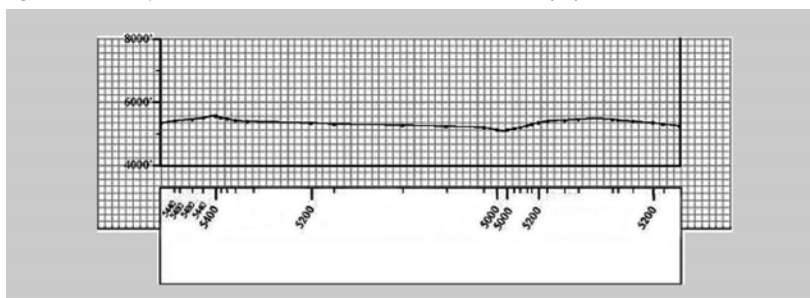


Fuente: http://geology.isu.edu/geostac/Field_Exercise/topomaps/topo_profiles.htm

1) Escoger la zona que nos interesa perfilar. Para ello seleccionamos dos puntos sobre el mapa, que uniremos con una línea recta. En la figura 89, el perfil topográfico que nos interesa se representa con la línea AB.

2) Marcar unos ejes de coordenadas en un papel milimetrado, tal como muestra la figura 90. El eje horizontal (X), que tendrá la misma escala del mapa, lo haremos coincidir con la línea trazada en el mapa y ahí representaremos las distancias horizontales entre las curvas de nivel. El eje vertical (Y) contendrá las cotas de las curvas de nivel que afectan al perfil.

Figura 90. Dibujo de las cotas de las curvas de nivel sobre papel milimetrado

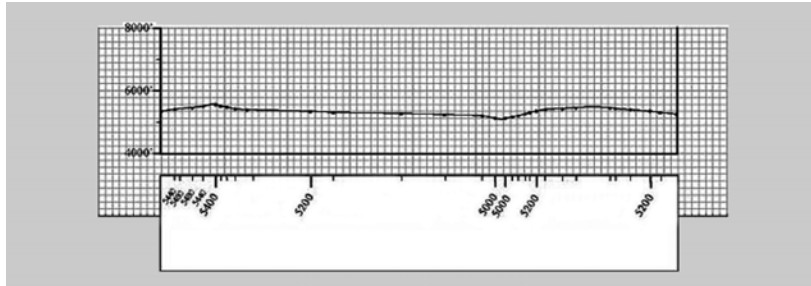


Fuente: http://geology.isu.edu/geostac/Field_Exercise/topomaps/topo_profiles.htm

3) Marcar sobre el eje horizontal las intersecciones de las curvas de nivel con la línea y desde estos puntos levantarlas perpendiculares al eje horizontal hasta el

punto que da la altura correspondiente a cada curva intersecada. En la figura 91 podéis ver que, si unimos después a cada uno de estos puntos resultantes, obtendremos el perfil del relieve según la dirección escogida en un principio.

Figura 91. Dibujo del perfil topográfico sobre papel milimetrado

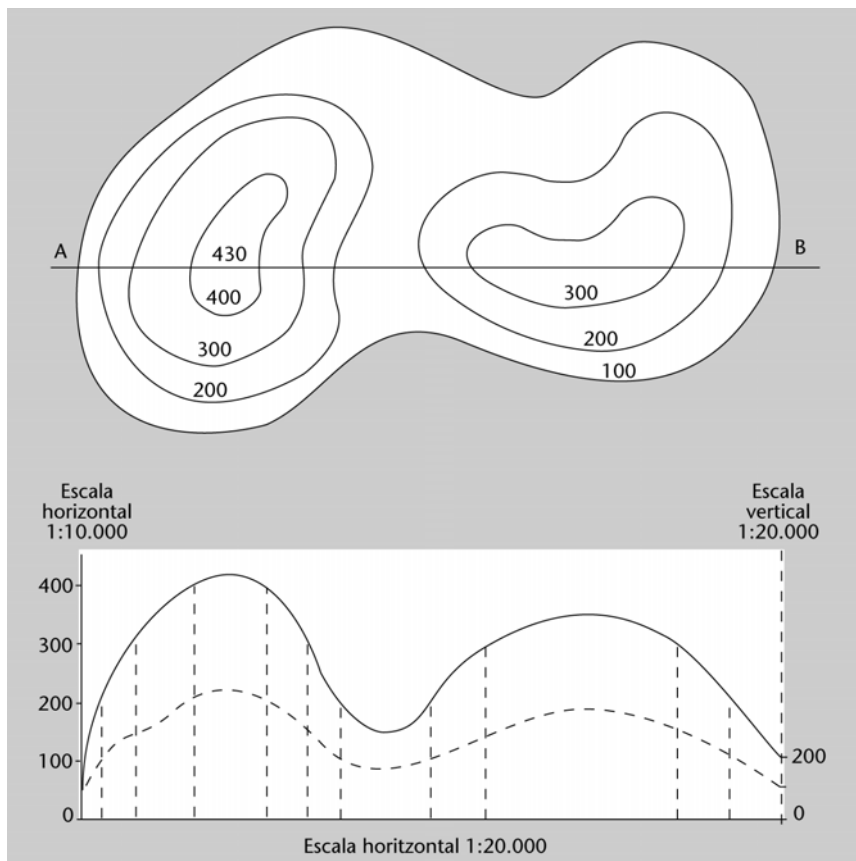


Fuente: http://geology.isu.edu/geostac/Field_Exercise/topomaps/topo_profiles.htm

4) Para completar el perfil se anotan las indicaciones complementarias que sirven de identificación: escala, orientación, altitud de algunos puntos de referencia, nombres de los principales picos y poblaciones, etc.

Cabe decir que las escalas horizontal y vertical deberán ser iguales si queremos un perfil proporcional a la realidad. Sin embargo, es frecuente que el perfil dibujado resulte poco expresivo y, a menudo, la escala vertical se exagera para que sobresalgan más los elementos del relieve, pero sin deformar anormalmente la realidad. Podéis comprobar eso en la figura 92, donde la línea de trazo continuo representa el perfil *AB* aumentado dos veces con respecto a la realidad, ya que la escala vertical es 1:10.000 y la escala horizontal, 1:20.000.

Figura 92. Ejemplo de perfil topográfico a escala 1:20.000



Fuente: Corberó, 1989

3. Datos cartográficos

En el tercer y último apartado de este módulo trataremos la información geográfica georreferenciada o geoespacial, es decir, los datos que pueden identificarse por sus coordenadas y que se componen de una parte gráfica (que muestra cómo es la información que representa) y otra alfanumérica (que describe a qué tipo de información hacen referencia).

Los datos geográficos describen características y recursos de la Tierra. Se capturan para la resolución de problemas y para la toma de decisiones asociadas con la geografía, es decir, con la localización, la distribución y las relaciones espaciales dentro de un entorno geográfico.

Este apartado se estructura en dos subapartados principales: la descripción de los tipos básicos de estructuras de datos cartográficos y el listado de los recursos para obtener estos datos.

Con respecto a las estructuras de los datos, estudiaremos los tipos vectorial y *raster*, y analizaremos sus diferencias. Cabe decir que, para ver cómo se almacenan estos datos o bien tener una visión topológica, tendréis que consultar los módulos "Bases de datos geográficos" e "Introducción a los sistemas de información geográfica", respectivamente, donde estudiaréis estos conceptos con más profundidad.

3.1. Descripción de los tipos básicos de representación de datos geográficos

Los datos geográficos son la base de todo SIG. Los SIG facilitan el almacenamiento, gestión, análisis y representación de los datos geoespaciales. Este tipo de datos se refiere, por ejemplo, a modelos digitales del terreno, vegetación, tipo de suelo, población y cualquier otro fenómeno localizado sobre la superficie de la Tierra.

Los SIG deben ser capaces de tratar información de origen muy diverso que según su estructura se clasifica de la siguiente manera:

- Información **raster** proveniente de imágenes de satélite, fotografías aéreas u ortofotomapas.
- Información **vectorial** obtenida por digitalización de mapas, por fotointerpretación o bien por datos obtenidos en trabajo de campo con dispositivos de posicionamiento global o GPS (*global position system*, 'sistema de posicionamiento global').

Breve apunte sobre topología

La topología es la estructura lógica de los datos geográficos que define las relaciones de conectividad, adyacencia, vecindad, etc. entre los diferentes objetos geográficos.

La topología permite varios tipos de análisis que no necesitan de la georreferenciación mediante coordenadas, como por ejemplo obtener el camino óptimo de una red o saber qué vecinos tienen un polígono dado.

Una topología robusta es uno de los hechos diferenciales más importantes que ofrece un SIG de alto nivel.



No es el objetivo de este módulo la explicación de las relaciones topológicas de los elementos cartográficos, dado que se trata en profundidad en el módulo "Introducción a los sistemas de información geográfica".

En los siguientes subapartados haremos una breve descripción de cada uno de estos tipos de datos geográficos.

3.1.1. Estructura de datos vectorial: puntos, líneas y polígonos

La estructura de datos vectorial representa el espacio según su geometría en forma de puntos, líneas y polígonos, y según sus propiedades topológicas en forma de nodos, arcos y polígonos.

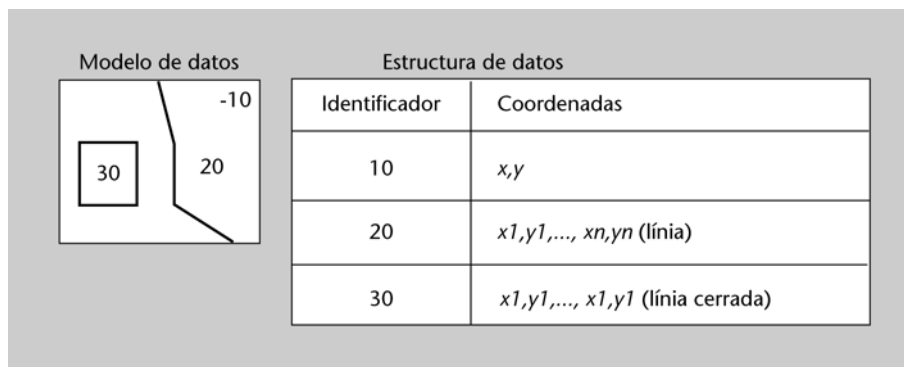
Esta estructura de datos representa los datos geográficos en forma de coordenadas, con sus atributos temáticos almacenados en un archivo aparte:

- La localización de un punto está determinada por un único par de coordenadas.
- La localización de una línea está determinada por un conjunto de segmentos lineales que conectan una serie de puntos y, por lo tanto, se representa mediante un conjunto de pares ordenados de coordenadas.
- Las **superficies** se describen mediante las líneas interconectadas que las delimitan, de manera que la coordenada de inicio coincide con la coordenada final.

Podemos distinguir tres tipos de estructuras de datos vectoriales:

- **Espagueti**: es una traducción directa de las líneas de un mapa en papel sin ninguna estructura asociada. Este tipo de estructura correspondería a un archivo de tipo CAD. En la figura 93 podéis ver cómo a cada elemento le corresponde un identificador al que simplemente se asocian sus pares de coordenadas.

Figura 93. Estructura de datos vectorial de tipo "espagueti"

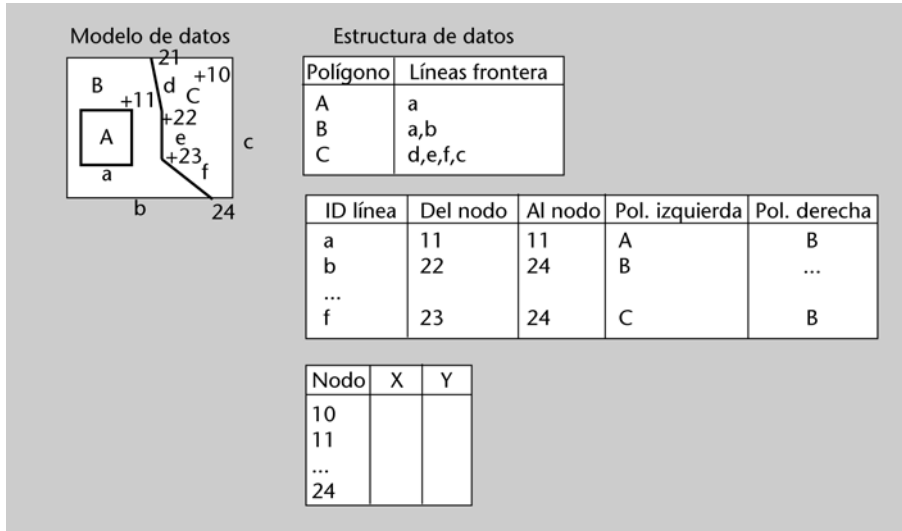


Fuente: adaptación de NCGIA Core Curriculum in GIScience (<http://www.ncgia.ucsb.edu>)

Este tipo de estructura no es óptima para las operaciones de análisis y contiene información redundante, por lo cual necesita de más espacio de almacenamiento.

- Jerárquica:** es una estructura de datos que facilita poder obtener información de puntos, líneas y áreas de manera separada y estructurada jerárquicamente. Fijaos en la figura 94, en cómo primero se estructura la información relativa a los polígonos, después la de las líneas y, finalmente, la información de los nodos que la componen.

Figura 94. Estructura de datos vectorial de tipo jerárquica

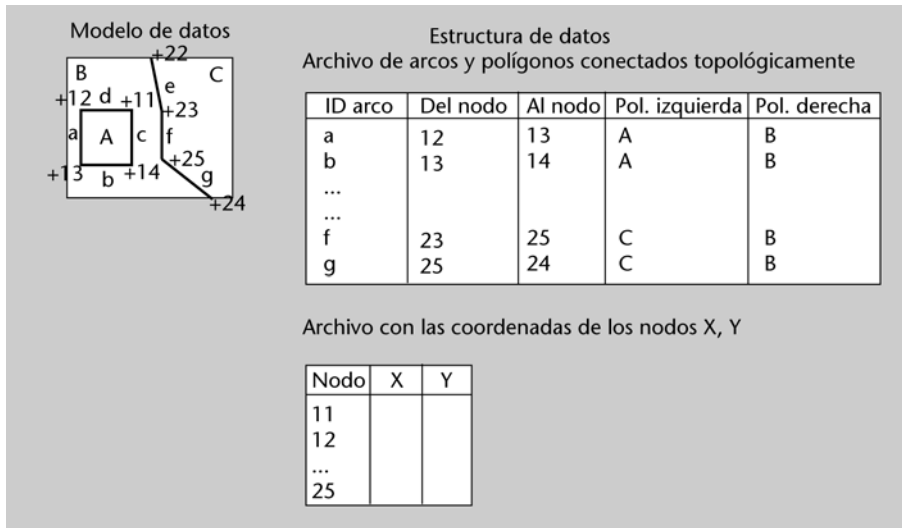


Fuente: adaptación de NCGIA Core Curriculum in GIScience

- Topológica:** es una estructura que se basa en las relaciones espaciales de los diferentes elementos almacenando información específica de las relaciones de adyacencia. En este caso, la información básica por líneas y áreas son tramos de líneas rectas (segmentos). Cada segmento individual se define por las coordenadas de los puntos de sus extremos (nodos).

Tal como podéis ver en la figura 95, para cada segmento se guarda el nodo inicial y final del segmento y el polígono a la izquierda y a la derecha del segmento (según su dirección). Las coordenadas se guardan para cada nodo en un archivo aparte indicando el identificador del nodo.

Figura 95. Estructura de datos vectorial de tipo topológica



Fuente: adaptación de NCGIA Core Curriculum in GIScience

Esta estructura de datos se utiliza para representar objetos del tipo siguiente:

- Elementos con dimensiones negligibles desde un punto de vista cartográfico que representan su localización con puntos, como por ejemplo vértices geodésicos, centros de municipios, etc.
- Elementos que forman parte de redes y que se representan con líneas, como por ejemplo carreteras, ríos, líneas ferroviarias, etc.
- Elementos con dos dimensiones que se representan con polígonos, como por ejemplo límites administrativos, clasificación de los tipos de suelo, edificaciones, etc.

3.1.2. Estructura de datos *raster*: píxeles

La estructura de datos *raster* es un método de almacenamiento, procesamiento y visualización de datos geográficos. Esta estructura de datos divide el espacio en una malla de celdas cuadradas que reciben el nombre de *píxeles*.

En la figura 96 se muestran las características de la estructura de datos *raster* que describiremos a continuación:

- La localización de cada celda se define por su número de fila y columna. Aunque cada celda tiene asociadas unas coordenadas, éstas no se almacenan explícitamente sino que se almacenan las coordenadas correspondientes a la celda situada en la esquina superior izquierda de la cuadrícula y, mediante la distribución en filas y columnas y las dimensiones del píxel, se calculan las coordenadas asociadas al resto de celdas.
- El área de cada píxel define la resolución espacial de los datos.
- El valor que almacena cada píxel indica el tipo de objeto, fenómeno o condición que se encuentra en una localización particular.
- Los valores pueden ser enteros, reales o alfanuméricos. En el caso de valores enteros, éstos representan una codificación que se refiere a una descripción del valor en una tabla anexa (*look-up table*).
- En una misma localización con diferentes atributos, sus valores se almacenan en temas separados.

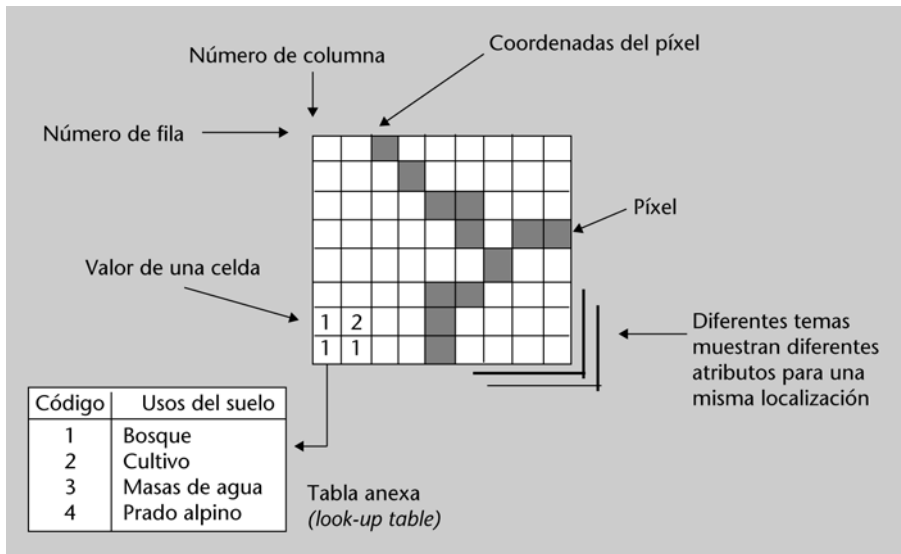
Los datos *raster* pueden definir mallas con diferentes estructuras, lo cual define diferentes formatos digitales de archivos *raster*, como por ejemplo, TIN (*triangulated irregular network*), QuadTrees y GRID.

Las imágenes de satélite, las fotografías aéreas así como los ortofotomapas son ejemplos de datos geográficos almacenados en este formato.

Píxel

El término *píxel* proviene de la contracción de las palabras inglesas *picture* y *element*, es decir 'elemento de imagen'.

Un *píxel* representa la unidad elemental mínima de información de una imagen digital.

Figura 96. Características de la estructura de datos *raster*

Fuente: adaptación de NCGIA Core Curriculum in GIScience

3.1.3. Comparación entre los modelos de datos vectorial y *raster*

En general, podemos decir que ninguno de los dos modelos, el vectorial o el *raster*, es mejor que el otro; aunque sus características hacen que, en función del proyecto que se quiera desarrollar, se escoja uno u otro.

Por una parte, en los modelos de datos vectoriales encontramos las siguientes ventajas:

- Proporcionan mejor precisión gráfica que los modelos *raster*.
- Manejan mejor la topología, tal como veréis en el módulo "Introducción a los sistemas de información geográfica".

Por otra parte, en los modelos de datos *raster* encontramos estas otras ventajas:

- Representan mejor los fenómenos espaciales continuos.
- Facilitan mejor la integración de los datos.
- Manejan mejor las operaciones de cálculo y actualización.

3.2. Fuentes de datos cartográficos

Ahora que ya hemos visto las principales estructuras de los archivos que contienen información geoespacial, enumeramos las diferentes fuentes de datos que nos serán de utilidad en la realización de nuestros proyectos.

A continuación se muestran recursos tanto para encontrar datos *raster*, tales como las imágenes de satélite o los modelos digitales del terreno, como fuentes de datos vectoriales de diferentes organizaciones y con diferente temática.

En el módulo "Bases de datos geográficos" estudiaréis en profundidad los formatos de almacenamiento de los datos *raster*.

Se ofrece un listado de los recursos disponibles en Internet para la obtención de datos cartográficos de diversa índole. Vista la gran cantidad de recursos disponibles, probablemente nos habremos dejado muchas referencias, pero seguro que con las que aquí se presentan tendréis un buen lugar por donde empezar a buscar.

Clasificaremos las fuentes de datos en:

- **Temáticas.** Dentro de este tipo de datos tenemos los usos del suelo, los mapas de vegetación o los geológicos.
- **Topográficas.** Los mapas topográficos pueden contener elevaciones, carreteras y ferrocarriles, ríos y lagos, fronteras políticas y administrativas, datos catastrales, etc.
- **De satélite.** La información obtenida con los sensores de imagen puede ser vegetación, cultivos, geología, usos del suelo, zonas urbanas y rurales. LandSat y TM (Thematic Mapper) son las fuentes comunes para este tipo de datos.

3.2.1. Fuentes de datos temáticos

Los tipos de datos temáticos pueden ser tan variados como el objetivo de los mapas que los representan. Ya hemos comentado que los usos del suelo, la vegetación y los datos geológicos son algunos tipos de datos temáticos, aunque hay muchos otros. A continuación tenéis algunos enlaces web correspondientes a estos tipos de datos:

1) **USGS Land Use:** <http://eros.usgs.gov/products/landcover.html>

2) **Canada Land Inventory (Agriculture):**

- <http://nlwis-snite1.agr.gc.ca/cli-itc/index.phtml>
- <http://geogratis.cgdi.gc.ca/CLI/frames.html>

3) **Instituto de Estadística de Cataluña (Idescat):** <http://www.idescat.net>

4) **Instituto Nacional de Estadística:** <http://www.ine.es>

5) **Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña:** http://mediambient.gencat.net/cat/el_departament/cartografia/fitxes/inici.jsp?ComponentID=7150&SourcePageID=134357#1

6) **Datos geodésicos del Instituto Cartográfico de Cataluña:** http://www.icc.cat/web/content/ca/prof/geodesia/inici_geodesia.html

3.2.2. Fuentes de datos topográficos

Las fuentes de datos topográficos hacen referencia a los tipos de elementos que se pueden encontrar dentro de un mapa topográfico. Estos datos pueden ser tanto *raster* –por ejemplo, los modelos digitales del terreno–, como vectoriales –por ejemplo, las carreteras y ferrocarriles, ríos y lagos, límites administrativos, datos catastrales, etc. A continuación se listan algunas fuentes de datos topográficos tanto de ámbito mundial como de ámbito local:

1) **Datos *raster* - modelos de elevación del terreno (MDT)**. Actualmente podemos obtener modelos de elevación del terreno de cualquier parte del planeta, en diferentes resoluciones:

a) **GTOP30** es un modelo digital de elevaciones *raster* que recubre la superficie terrestre (no marina), con aproximadamente 1 km de resolución. Es muy apropiado para trabajar a escala continental y con zonas muy extensas (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>).

Las características del MDT global, con el formato de distribución de los datos, las fuentes de información originales y los métodos de construcción, precisión y sugerencias a los usuarios están disponibles en <http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/README.html>.

El modelo del terreno en formato USGS se puede visualizar con el programa 3DEM, que se puede bajar de <http://www.visualizationsoftware.com/3dem.html>.

b) Los datos **SRTM** tienen una resolución de 90 m y su cobertura es casi global. Proporcionan la cobertura de mejor resolución que hay actualmente para datos que no son de los Estados Unidos (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data>).

c) Para datos de los Estados Unidos, podemos obtener datos SRTM de 30 m y **NED** (*national elevation data*) de hasta 10 m de resolución (<http://seamless.usgs.gov>).

d) Modelo digital del terreno correspondiente al ámbito de **Cataluña** con resolución de 200 m: http://www.icc.cat/web/content/ca/common/icc/icc_serveis_descarregues_ciu.html.

2) Datos vectoriales

a) **Digital Chart of the World (DCW)**. Base de datos vectorial a escala 1:1.000.000 que se usa como base de referencia mundial. Está disponible de manera gratuita desde el 2006, aunque los datos no se han actualizado desde 1992. Contiene datos temáticos como carreteras, ferrocarriles, cubiertas vegetales, fronteras políticas, océanos, etc. (<http://www.lib.ncsu.edu/gis/dcw.html>).

Podéis consultar más información en http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Chart_of_the_World.

b) USGS Cartographic Data. USGS es un proveedor de cartografía digital a bajo coste. Proporciona datos vectoriales en formato DLG (*digital line graph*) que describen carreteras, comunicaciones, hidrografía y elementos topográficos (<http://eros.usgs.gov/products/map.html>).

c) Base Municipal de Cataluña E 1:1.000.000 (http://www.icc.cat/web/content/ca/common/icc/icc_serveis_descarregues_ciu.html).

3.2.3. Fuentes de datos de imágenes de satélite

En Internet hay numerosas fuentes de imágenes de satélite. Las imágenes de satélite actualizadas son de pago y su coste varía según su resolución. Las imágenes que se pueden obtener de manera gratuita no serán de alta resolución, pero en principio serán suficientes si se trata de proyectos piloto o con objetivo didáctico.

1) **CREPAD** (<http://www.crepad.rcanaria.es/es/index.html>). El CREPAD es la infraestructura orientada a dar servicio a investigadores y usuarios finales que utilizan datos y productos de observación de la Tierra. Como ejemplo, podemos encontrar mapas de temperatura superficial del mar (SST), o bien mapas de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), entre otros.



Logotipo de CREPAD

2) **Digital Globe** (<http://www.digitalglobe.com>). Proveedor de imágenes de alta resolución. Las imágenes son de pago, pero dispone de una galería de imágenes cuya reproducción está permitida en ciertas condiciones. Google Earth utiliza las imágenes facilitadas por Digital Globe.



Logotipo de Digital Globe

3) **GeoCover LANDSAT 7** (<http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>). Ortoimágenes Landsat de todo el mundo en formato MrSID gratuitas. Dentro del marco del proyecto SP (Scientific Data Purchase), la NASA ha adquirido gran cantidad de datos del sector privado que pone de manera parcial al público. Las imágenes se distribuyen gratuitamente como mosaicos Landsat ortorrectificados a UTM en WGS84 con resolución de unos 30 m, según las zonas.



Logotipo de la NASA

En el siguiente enlace tenéis un tutorial del GeoCover, donde veréis ejemplos de las imágenes que os podéis bajar: <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/tutorial/Landsat%20Tutorial-V1.html>.

4) **SatCat**, servidor de imágenes de satélite Landsat de Cataluña (http://www.mediambient.gencat.net/esp//el_departament/cdma/satcat.jsp). Desde el 2002 el Departamento de Medio Ambiente y Vivienda dispone de un banco de imágenes Landsat, herramienta fundamental para llevar a cabo el segui-



Logotipo del Departamento de Medio Ambiente y Vivienda de la Generalitat de Cataluña

miento de cambios territoriales en Cataluña. Este banco contiene imágenes recibidas cada 8-16 días, siempre que la meteorología lo permita, y se va incrementando mensualmente.

A partir de junio del 2004 el **Departamento de Medio Ambiente y Vivienda** pone a disposición pública un servicio de consulta y extracción de imágenes, el SatCat. Las personas interesadas pueden buscar zonas y partes concretas de las imágenes y grabarlas en los sus propios CD o DVD.

Tenéis un manual muy completo, donde no sólo se describen las características de las imágenes proporcionadas, sino que se ofrece una introducción muy clara a los satélites LandSat y al tipo de datos que proporcionan, en el siguiente enlace: http://www.mediambient.gencat.net/Images/esp/43_35835.pdf.

5) Servidor de imágenes del sensor SPOT Vegetation (<http://free.vgt.vito.be>). Servidor de imágenes gratuitas del sensor SPOT Vegetation correspondientes a síntesis de diez días y organizadas en diez regiones predefinidas de la Tierra. También podéis acceder allí con el enlace <http://www.spot-vegetation.com>.

6) Shuttle Radar Topography Mission, SRTM (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>). Misión del Endeavour con el objetivo de cartografiar el relieve de todo el globo terráqueo con una precisión de hasta 1 segundo de arco por píxel (unos 30 metros). Esta misión ha permitido la creación de un modelo digital del terreno de la Tierra de gran precisión.

Los datos se pueden obtener con FTP anónimo en el enlace siguiente: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2>.

En la dirección siguiente tenéis una muy buena descripción del formato: ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/Documentation/SRTM_Topo.pdf.

El USGS proporciona datos SRTM mediante un servidor geográfico muy sofisticado que permite al usuario seleccionar la zona de la Tierra que quiera y recibirá un archivo zip de dicha zona con los datos seleccionados.

7) USGS Global Visualization Viewer (<http://edclxs2.cr.usgs.gov>). Este servidor ofrece previsualización de imágenes recientes de la plataforma LandSat 7 de cualquier parte del planeta. Las imágenes a resolución completa son de pago, pero el USGS permite una previsualización en formato JPG con una resolución espacial de 240 m (con respecto a los 30 m de resolución originales).

8) WMS Global Mosaic (<http://onearth.jpl.nasa.gov/WK/bmng>). Mosaico interactivo del planeta formado por imágenes LandSat7, tomadas entre los años 1999 y 2003. El interés principal de este enlace es que ofrece otros mosaicos



Logotipo del CNES



Logotipo de la National Geospatial-Intelligence Agency



Logotipo del USGS



Logotipo del Jet Propulsion Laboratory

interactivos: mapa de reflectancias SRTM, mosaico MODIS. Podéis bajar los datos desde <http://wmt.jpl.nasa.gov>.

9) Imágenes de satélites meteorológicos

- Fototeca de imágenes de satélites meteorológicos: <http://www.sat.dundee.ac.uk/auth.html>
- GOES (GEOstationary Satellite Server): <http://www.goes.noaa.gov>
- METEOSAT Service Imagery: <http://oiswww.eumetsat.org/SDDI/cgi/listImages.pl?m=bnw>
- InfoMET (imágenes recientes de satélites NOAA): <http://www.infomet.fcr.es/noaa>

Resumen

En este módulo hemos definido y desarrollado los conceptos básicos y fundamentales de la geodesia y la cartografía que todo nuevo usuario de SIG debería conocer.

Hemos comenzado justificando el estudio de la geodesia y definiendo el objetivo principal del temario del primer apartado de este módulo: la determinación de posiciones sobre la superficie terrestre o georreferenciación.

Después de definir los diferentes sistemas de coordenadas que se pueden utilizar para representar un punto sobre una esfera, se ha hecho un estudio en profundidad de las proyecciones cartográficas. Hemos empezado por su clasificación según las propiedades geométricas que conservan (forma, área, distancia y dirección) y según la superficie de donde derivan (cónicas, cilíndricas y acimutales) para a continuación analizar cuál es la proyección más adecuada para un determinado proyecto cartográfico. Una vez que se han estudiado las características generales de las proyecciones, se ha hecho especial mención de la proyección UTM, dada su utilización en la cartografía de nuestro territorio.

Una vez visto cómo se pueden determinar posiciones, sea sobre una esfera o sobre un plano, y se ha justificado el estudio del concepto de *georreferenciación*, hemos pasado a definirlo formalmente y a hablar de su materialización sobre el territorio mediante las redes geodésicas. Hemos podido ver las diferentes redes geodésicas de la Península Ibérica y las ventajas del nuevo sistema de referencia oficial para la cartografía terrestre del Estado español: el ETRS89.

Para la determinación de la altura, teníamos que estudiar las diferentes superficies de referencia terrestres como son el geoide y el elipsoide, cuya definición hemos dado y de las que hemos explicado las características. Hemos visto cómo se relacionan las alturas ortométricas con las elipsoidales mediante la ondulación del geoide y hemos podido ver ejemplos de cálculo.

Para acabar el primer apartado de este módulo, se han planteado los algoritmos más comunes para la transformación de coordenadas entre sistemas de referencia y se ha enumerado una lista de herramientas geodésicas disponibles en Internet que nos serán de utilidad al ofrecer la explicación de la transformación de un punto en coordenadas UTM referidas a ED50 a otro en coordenadas UTM referidas a ETRS89.

El segundo apartado de este módulo didáctico, se ha dedicado al estudio de la cartografía. Lo hemos iniciado con una contextualización histórica de la ma-

teria, donde hemos podido ver la imagen que han tenido de nuestro planeta las diferentes civilizaciones.

Se ha definido el concepto de mapa y se han mostrado ejemplos de los distintos tipos de cartografía existentes (básica, temática y derivada) en función del objetivo y funcionalidad del mapa. A continuación hemos estudiado el flujo de un proyecto cartográfico: cómo se elabora un mapa, cuál es el proceso que debe seguirse y cuáles son las propiedades métricas y comunicativas que debe cumplir.

Con respecto a las propiedades métricas, hemos estudiado en profundidad el concepto de *escala* y el de *simbolización*; con respecto a las propiedades comunicativas que nos aseguran una lectura fácil y rápida de la información mediante la jerarquización de la información, hemos puesto especial énfasis en el proceso de generalización.

También debíamos hablar del tratamiento de la representación de la altura en los mapas topográficos y hemos podido ver la definición y características de sus elementos representativos, como son las curvas de nivel, las cotas y el sombreado del terreno.

Finalmente, hemos querido ofrecer una visión práctica de la cuestión de la altura y hemos visto cómo se pueden calcular alturas de puntos de un mapa a partir de las curvas de nivel. También se ha explicado cómo se puede calcular la pendiente de un terreno y de qué maneras se puede expresar, para acabar definiendo el concepto de *perfil topográfico*, y hemos visto un ejemplo de cómo calcularlo.

Para acabar, en la tercera parte se ha hecho un repaso de los diferentes tipos de datos geográficos y de sus fuentes.

Actividades

1. ¿Un punto tiene una latitud y longitud geodésicas únicas?
2. ¿UTM es sinónimo de coordenadas ED50?
3. ¿Por qué ETRS89 y no WGS84?
4. Tenemos el punto (448.500,79, 4.377.580,93) en coordenadas UTM F30N ETRS89. ¿Cuáles son sus coordenadas en ED50?
5. Fijaos en la figura 97. ¿Cuál es el mejor camino para subir al pico de San Carlos?

Figura 97. Trozo de mapa topográfico con el pico de San Carlos



Fuente: <http://www.tasagraphicarts.com/activities/profile.html>

Ejercicios de autoevaluación

1. Hemos visto los principales sistemas de coordenadas. ¿Podéis explicar cómo se expresan las coordenadas esféricas y cuáles son el origen y las unidades de éstas?
2. ¿Con respecto a los sistemas de proyección, recordáis a qué hace referencia el elipsoide y el datum?
3. Hemos estudiado las coordenadas UTM y cómo debe leerse un mapa. En la figura 98 se muestra un trozo de un mapa topográfico donde tenéis algunos elementos destacados. ¿Podéis decir cuáles son las coordenadas de los siguientes elementos?





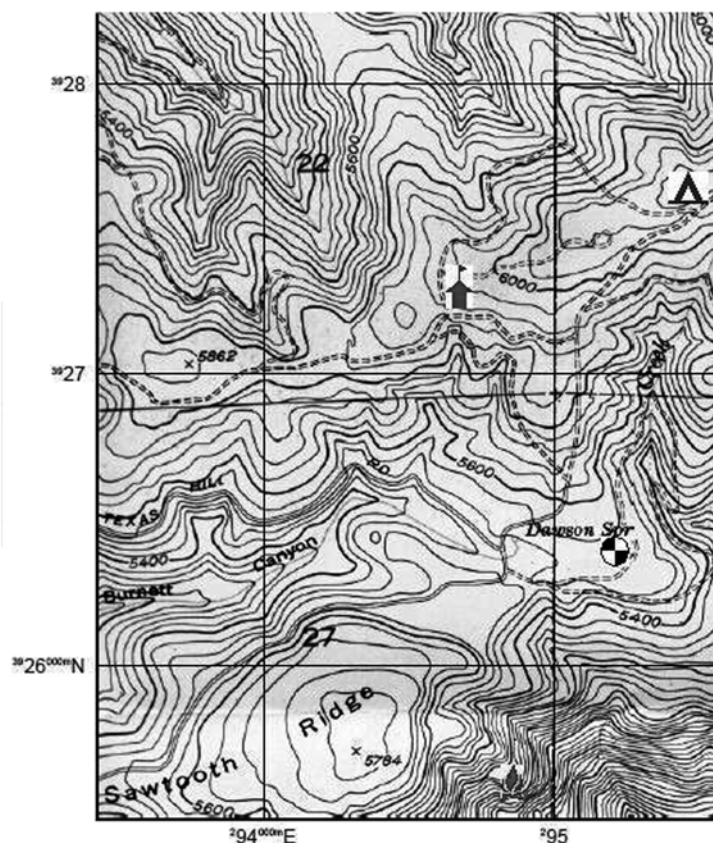
- a) 
- b) 
- c) 
- d) 

Figura 98. Mapa topográfico con ciertos elementos destacados

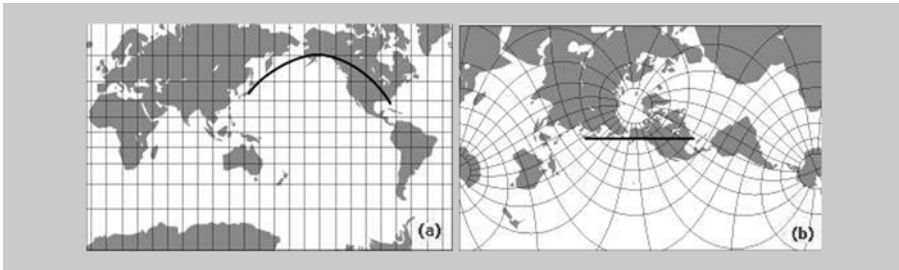


Fuente: elaboración propia

4. Continuando con las coordenadas UTM, ¿sabríais decir en cuántos husos divide el mundo el sistema de coordenadas UTM? ¿Y cuántos husos recubren España? Finalmente, ¿cuál es el huso que recubre Cataluña?

5. También hemos estudiado los elementos que intervienen en el diseño cartográfico. ¿Recordáis qué es la escala cartográfica y cómo se expresa?
6. Hemos visto que hay diferentes tipos de mapas, pero ¿qué diferencia hay entre un mapa topográfico básico y un mapa temático?
7. Veamos vuestra destreza con los recursos cartográficos. ¿Sois capaces de decir cuáles son las coordenadas geográficas de los dos siguientes lugares sobre la Tierra?
- a) **The eye of Maldivas**, Atoll of North Mali (El ojo de las Maldivas, atolón norte de Malé).
- b) **Great Barrier Reef**, Queensland, Australia (Gran barrera de Coral, Queensland, Australia).
8. Observad la figura 99. En la imagen 99a, ¿qué representa el arco de curva que une Miami con Tokio? Y en la imagen 99b, ¿qué representa la línea recta que une estas dos ciudades? ¿Qué diferencia a las dos figuras?

Figura 99. Arco de curva (a) y línea recta (b) entre Miami y Tokio



Fuente: <http://www.gis.psu.edu/projection>

9. No podía faltar la siguiente pregunta: ¿qué es un datum geodésico? Escoged una de las siguientes opciones:
- a) El punto que define la localización de Greenwich, Inglaterra.
- b) El proyecto de un mapa teórico desarrollado para proporcionar una escala precisa sobre la superficie completa de un esferoide.
- c) El conjunto de parámetros que definen las dimensiones y la forma de la Tierra, así como el origen del sistema de coordenadas que describe las posiciones sobre la Tierra.

Solucionario

Actividades

1. Dado que hay diferentes datums, tendremos diferentes meridianos y paralelos de origen en función de la posición en el espacio, de las dimensiones y de la forma de los elipsoides de referencia asociados. En consecuencia, un punto sobre la superficie de la Tierra tendrá una latitud y longitud diferente según el datum al que haga referencia.

2. La proyección universal transversal de Mercator (UTM) no es exclusiva de ningún datum en particular. Un sistema de proyección cartográfica es una función biunívoca de transformación entre latitudes, longitudes geodésicas y coordenadas planas. Así pues, tendremos coordenadas UTM WGS84, basadas en el elipsoide del mismo nombre; UTM ED50, basadas en el elipsoide internacional (Hayford); y UTM ETRS89, basadas en el elipsoide SGR80.

3. WGS84 y ETRS89 son equivalentes para la mayor parte de las aplicaciones topográficas y cartográficas. El primero se basa en el elipsoide del mismo nombre, mientras que el segundo se basa en el elipsoide SGR80, adoptado por la Asociación Internacional de Geodesia de 1979. Los dos elipsoides son idénticos excepto en la excentricidad, en la que son ligeramente diferentes. ETRS89 es el sistema de referencia geocéntrico oficial en Europa, de precisión mucho más elevada que la última solución WGS84.

4. Este punto tiene coordenadas (448.611,14, 4.377.788,61) UTMF30N ED50. Para realizar el cálculo podéis utilizar las calculadoras geodésicas del IGN.

Calculadores geodésicas de l'IGN:
http://www.ign.es/ign/es/IGN/calculadora_geodesica.jsp

5. Para resolver este ejercicio hay que realizar un perfil topográfico del terreno que podéis hacer de manera interactiva en el enlace siguiente: <http://www.tasagraphicarts.com/activities/profile.html>

Ejercicios de autoevaluación

1. Las coordenadas esféricas de un punto se expresan mediante dos ángulos medidos desde el centro de la Tierra, que se llaman *latitud* y *longitud*. El origen de este sistema de coordenadas es el (0, 0), que es el punto donde se cruzan las líneas de referencia de la latitud y la longitud, es decir, donde se cruzan el ecuador y el principal meridiano. Las unidades en las que se expresan son los grados sexagesimales.

2. El elipsoide y el datum conforman el sistema de referencia de las coordenadas de la proyección cartográfica.

3. Las coordenadas UTM de los elementos destacados son las siguientes:

- a) (946, 272)
- b) (948, 255)
- c) (951, 263)
- d) (954, 276)

4. El sistema de coordenadas UTM divide el mundo en 60 husos, cada uno de 6° de amplitud, que de esta manera cubren los 360° de la esfera terrestre.

Los husos 29, 30 y 31 cubren la Península Ibérica y, concretamente, el huso 31 corresponde a la zona de Cataluña.

5. En cartografía, la escala de un mapa es la relación constante entre una distancia medida sobre un mapa o plano y la distancia correspondiente medida sobre el terreno representado. Se puede expresar tanto de manera gráfica como de manera numérica.

6. La cartografía básica es la que está orientada a la representación general de los fenómenos geográficos existentes en su ámbito, sin dar más intensidad a un fenómeno que a otro. Sin embargo, la cartografía temática sí que destaca o desarrolla algún aspecto concreto de la información topográfica contenida en el mapa.

7. Para consultar las coordenadas geográficas de los dos lugares que se piden, podéis utilizar diferentes recursos. Por una parte, tenéis el GoogleEarth, donde podéis visualizar casi cualquier lugar sobre la faz de la Tierra mediante consulta por topónimo; y por otra, podéis acceder a la web <http://www.earthfromabove.com>.

GoogleEarth:
<http://earth.google.com/intl/es/index.html>

Se cual sea la herramienta que habéis utilizado, las coordenadas son éstas:

- a) **The eye of Maldivas**, Atoll of North Mali: (4° 13' N, 73° 25' E)

b) **Great Barrier Reef**, Queensland, Australia: (16° 55' S, 146° 03' E)

8. La figura 99a muestra el aspecto normal de la proyección de Mercator, donde el arco representa el círculo máximo entre Miami y Tokio. En la figura 99b se puede ver el mismo círculo máximo. La diferencia entre las dos figuras es el aspecto de la proyección, que en la segunda es oblicuo.

9. La respuesta correcta es la c. Un datum geodésico es el conjunto de parámetros que definen las dimensiones y la forma de la Tierra, así como el origen del sistema de coordenadas que describe las posiciones sobre la Tierra.

Glosario

acimut *m* Ángulo horizontal medido en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte. Se llama *rumbo* si se mide con respecto al norte magnético, mientras que utilizamos el término *acimut* si se mide con respecto al norte geográfico.

actualización cartográfica *f* Proceso de revisión y modificación de la información gráfica y temática, a fin de que la cartografía muestre los cambios que ha habido en el tiempo en el territorio que representa.

aerotriangulación *f* Proceso de desarrollo de una red de posiciones horizontales y/o verticales a partir de un grupo de posiciones de coordenadas conocidas usando medidas directas o indirectas a partir de fotografías aéreas y cálculos matemáticos.

altitud *f* Distancia medida verticalmente desde un punto en la superficie de nivel de referencia que constituye el origen de las altitudes de los mapas topográficos de un país. En el caso de España, las altitudes se refieren al nivel medio del mar en Alicante.

altitud elipsoidal *f* Altitud de un punto de la superficie terrestre medido con respecto al elipsoide de referencia. Son las alturas que nos dan los receptores de los sistemas globales de posicionamiento (GPS).

altitud geoidal *f* Ved *ondulación del geoide*.

altitud ortométrica *f* Altitud de un punto de la superficie terrestre sobre el geoide, medida a lo largo de la línea de plomada o dirección de la gravedad. A causa de la falta de paralelismo entre las superficies de nivel o superficies equipotenciales en el campo de la gravedad, la altitud ortométrica es distinta para puntos de una misma superficie de nivel.

cartografía *f* Ciencia que tiene por objeto la confección de mapas y comprende el conjunto de estudios o técnicas que intervienen en su proceso.

coordenada *f* Cantidad lineal o angular que define la posición de un punto en relación con un marco de referencia.

cota *f* Valor numérico que representa la altitud de un punto con respecto a la superficie de nivel de referencia.

curva de nivel *f* Línea imaginaria sobre el terreno cuyos puntos tienen la misma elevación con respecto a un datum dado.

datum geodésico *m* Conjunto de parámetros que determinan la forma y las dimensiones del elipsoide de referencia.

ED50 *m* *european datum 1950*.

elipsoide de referencia *m* Superficie formada por la revolución de una elipse en torno a su eje menor. Es la figura matemática que más se aproxima al geoide.

escala cartográfica *f* Proporción o relación matemática entre la dimensión de los elementos representados en un mapa y su dimensión en la realidad.

ETRS89 *m* Ved *european terrestrial reference frame 1989*.

european terrestrial reference frame 1989 *m* Sistema de referencia terrestre europeo formado por una red de puntos de gran precisión. Desde el año 2007, es el nuevo sistema de referencia geodésico en la Península Ibérica. sigla ETRS89

fotogrametría *f* Conjunto de métodos y operaciones que permiten la confección de mapas topográficos y planos a partir de fotografías aéreas o terrestres.

fotointerpretación *f* Interpretación de la superficie del terreno a partir de fotogramas.

geodesia *f* Ciencia que tiene por objeto el estudio y la determinación de la forma, las dimensiones y el campo gravitatorio de la Tierra, así como su variación en el tiempo.

geoide *m* Superficie equipotencial (es decir, la superficie en la que el potencial de la gravedad es constante) que mejor aproxima al nivel medio del mar.

georreferenciación *f* Proceso que se utiliza para definir la posición de un objeto en un plano con su posición sobre la superficie terrestre.

Greenwich Observatorio astronómico al SE de Londres por el cual pasa el meridiano 0° o de origen de medición de las longitudes E o W de todo el mundo.

huso *m* Sección del globo terráqueo limitada por dos meridianos o círculos máximos. En la proyección UTM, cada huso es determinado por dos meridianos separados por una longitud de 6° grados sexagesimales.

latitud *f* Ángulo, medido sobre un arco de meridiano, que hay entre un punto de la superficie terrestre y el ecuador.

longitud *f* Distancia angular, medida sobre un arco de paralelo, que hay entre un punto sobre la superficie terrestre al este o el oeste del meridiano de Greenwich.

mapa *m* Representación gráfica de las características físicas de una parte o de toda la superficie de la Tierra, mediante símbolos, a una determinada escala y con una proyección específica.

mapa derivado *m* Mapa formado por procesos de adición o generalización de la información topográfica contenida en la cartografía básica preexistente.

mapa temático *m* Mapa sobre el que se destaca o desarrolla algún aspecto concreto de la información topográfica contenida.

mapa topográfico *m* Mapa que muestra los elementos de la superficie terrestre, tradicionalmente vinculados a la topografía y a la forma de la Tierra, de la manera más fiel posible dentro de las limitaciones de la escala.

meridiano *m* Círculo máximo de la Tierra que pasa por los polos. Todos los puntos que pertenecen al mismo meridiano se caracterizan por tener la misma hora local.

meridiano de Greenwich *m* Meridiano origen que pasa por Greenwich e indica los 0° de longitud a partir de los cuales se mide la longitud de todos los meridianos.

modelo geoidal *m* Descripción del patrón de las ondulaciones del geoide sobre la superficie de la Tierra como función de la latitud y la longitud.

ondulación del geoide *f* Diferencia de altura entre las superficies del geoide y del elipsoide en cualquier punto sobre la superficie de la Tierra.

ortofoto *f* Imagen fotográfica del terreno, con el mismo valor cartográfico que un plano, que ha sido sometida a un proceso de rectificación de la esfericidad de la Tierra.

paralelo de latitud *m* Círculo sobre la superficie de la Tierra, paralelo al ecuador, que conecta puntos de igual latitud.

píxel *m* Unidad mínima de información que se puede identificar en una imagen *raster*.

proyección cartográfica *f* Sistema para reproducir o representar la esfera terrestre en una superficie plana.

punto fundamental *m* Punto medido por observación astronómica, que sirve como origen para todas las coordenadas de una red geodésica.

raster *m* Conjunto de datos distribuidos en celdas y estructurados en filas y columnas. El valor de cada celda representa el atributo del elemento.

red geodésica *f* Conjunto de vértices geodésicos, materializados físicamente sobre el terreno, sobre los cuales se han realizado observaciones geodésicas con el fin de determinar la posición de la manera más precisa posible. Una red geodésica es la estructura que sostiene a toda la cartografía de un territorio.

Red Geodésica Nacional para Técnicas Espaciales *f* Red iniciada en 1994 que cubre todo el territorio nacional con al menos un vértice para cada hoja correspondiente al mapa topográfico nacional 1:50.000.
sigla REGENTE

REGENTE *f* Ved Red Geodésica Nacional para Técnicas Espaciales.

teledetección *f* Técnica para obtener información de la superficie terrestre mediante sensores de observación remotos, es decir, sin tener contacto con ella. Sus fuentes de información principales son las mediciones y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales.

triangulación *f* Conjunto de operaciones con el objetivo de fijar sobre la superficie que se quiere cartografiar la posición de puntos clave que forman una red de coordenadas geográficas de un mapa.

UTM *m* Universal transversal Mercator.

vertical astronómica *f* Dirección de la vertical de un punto de la superficie terrestre, que queda materializado por la dirección de la línea de plomada. Es la dirección del vector gravedad en este punto. También se llama *línea de plomada* o *vertical física*.

vértice geodésico *m* Puntos cuyo emplazamiento se ha medido con gran precisión y que se materializan sobre el terreno con hitos o señales.

WGS84 *m* Sistema geodésico mundial 1984.
en *world geodetic system* 1984

Bibliografía

Allan, A. L. (1997). *Maths for Mapmakers*. falta ciudad Whittles Publishing.

Andreu, M. A.; Simó, C. (1992). *Determinació del geoide UB91 a Catalunya*. Barcelona: Instituto Cartográfico de Cataluña ("Monografía técnica", 1).

Brewer, C. (2005). *Designing Better Maps: A Guide for GIS Users* (1.^a ed.). falta ciudad John Wiley & Sons / ESRI Press.

Burkard, R. K. (1984). *Geodesy for the Layman* (4.^a ed.). DEFENSE MAPPING AGENCY TECHNICAL REPORT TR80-003. [Versión PDF: http://geodesy.noaa.gov/PUBS_LIB/GeoLay.pdf] NGA Geodesy and Geophysics publications listing. (rev. 2007, <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/index.html>)

Corberó, M. V., y otros (1989). *Fer mapes* (1.^a ed.). Madrid: Alhambra.

Dana, P. H. (1995). *Map Projection Overview*. The Geographer's Craft Project. Austin: Dept. of Geography, University of Texas.
<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj_f.htm>

Dana, P. H. (1995). *Coordinate System Overview*. The Geographer's Craft Project. Austin: Dept. of Geography, University of Texas.

<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/coordsys/coordsys_f.html>

Dent, B. D. (1999). *Cartography: Thematic Map Design* (1.^a ed.). Boston [etc.]: WCB / McGraw-Hill.

Helmert, F. R. (1880). *Die mathematischen und physikalischen Theorien der hoheren Geodasie* (vol. I, reimpr., 1962). Minerva G. M. B. H.

Hofmann-Wellenhof B.; Moritz H. (2005). *Physical Geodesy*. Viena: Springer-Verlag. Edición actualizada del clásico de W. A. Heiskanen y H. Moritz de 1967.

ISBD (CM) 1987 Revised Version 1999. International Standard Bibliographic Description for Cartographic Materials.
<<http://www.ifla.org/VII/s6/news/isbd.pdf>>

Joly, F. (1982). *La Cartografía* (2.^a ed.). Barcelona: Ariel.

Mailing, D. H. (1992). *Coordinate Systems and Map Projections* (2.^a ed.). Oxford: Pergamon Press.

Monmonier, M. (1996). *How to Lie with Maps* (2.^a ed.). Chicago, IL: University of Chicago Press.

Perry-Castañeda library Map Collection.

<<http://www.lib.utexas.edu/maps/index.html>>

Robinson, A. H.; Sale, R. D.; Morrison, J. L.; Muehrcke, Ph. C. (1984). *Elements of Cartography* (5.^a ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.

Sobel, D. (1998). *Longitud. La verdadera historia de un genio solitario que resolvió el mayor problema científico de su tiempo*. Madrid: Debate.

Snyder, J. P. (1987). *Map Projections - A Working Manual*. U. S. Geological Survey Professional Paper 1395. Washington, DC: U. S. Government Printing Office.
<http://onlinepubs.er.usgs.gov/djvu/PP/PP_1395.pdf>

Snyder, J. P. (1993). *Flattening the Earth: Two Thousand Years of Map Projections*. Chicago: University of Chicago Press.