

Sistemas de Coordenadas.

Capítulo 1

Cartografía y Geodesia. Sistemas de proyección

Los Sistemas de Información Geográfica pueden definirse de forma provisional como sistemas que permiten almacenar datos espaciales para su consulta, manipulación y representación. La representación de datos espaciales es el campo de estudio de la **Cartografía**, por tanto es necesario comenzar introduciendo algunos conceptos básicos de esta ciencia.

A lo largo de la historia, el hombre ha sentido la necesidad de representar la superficie terrestre y los objetos situados sobre ella. El objetivo de los primeros mapas era servir de apoyo a la navegación, indicaban por tanto los rumbos (direcciones) que era necesario seguir para ir de un puerto a otro, eran los portulanos (figura ??). La exactitud en la representación de las tierras emergidas se consideraba accesoria, siendo lo fundamental la exactitud en rumbos y distancias entre puertos. Las cartas náuticas actuales mantienen un esquema similar aunque la generalización de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) ha revolucionado los sistemas de navegación.

En los inicios del período colonial ya no bastaba con poder llegar a puerto sino que había que medir distancias y superficies sobre los nuevos territorios para conseguir un mejor dominio de estos. Por otro lado se hace necesario representar los diversos elementos, recursos y factores ambientales de la superficie terrestre para conseguir una mejor visión de la distribución de los fenómenos naturales y asentamientos humanos sobre la superficie terrestre.

Ya en el siglo XVII, cartógrafos como Mercator demostraron que un sistema de proyección geométrico, junto con un sistema de localización basado en **coordenadas cartesianas**¹, es decir basadas en un par de ejes ortogonales² (X e Y), formando una cuadrícula (figura ??), mejoraba la fiabilidad de distancias, áreas o ángulos medidos sobre los mapas.

¹también llamadas coordenadas métricas

²Un par de ejes son ortogonales si se cortan en ángulo recto, son normales si tienen la misma escala, y se denominan ortonormales cuando cumplen ambas condiciones



Figura 1.1: Portulano

Al finalizar el siglo XVIII, los estados europeos habían alcanzado el grado de organización suficiente como para establecer sociedades geográficas cuyo cometido era representar sobre mapas la superficie terrestre, sus características y los elementos físicos y humanos situados sobre ellas.

1.1. Conceptos de Geodesia

La representación sobre un plano de un objeto como la Tierra reviste diversas dificultades:

- Si se proyecta un objeto esférico sobre un plano es inevitable que se produzcan distorsiones (figura ??)
- La Tierra no es siquiera un objeto esférico sino que su forma se aproxima a un **elipsoide** o **esferoide**³ ligeramente achatado en los polos (figura ??)
- Esta aproximación tampoco es válida cuando se desciende al detalle ya que la Tierra incluye numerosas irregularidades, se habla por tanto de **Geoide** para hacer referencia a la Tierra como objeto geométrico irregular (figura ??)

³Fue Newton quien por primera vez sugirió la forma elipsoidal de la Tierra al tener noticia de la necesidad de acortar los péndulos de los relojes en la proximidad del Ecuador

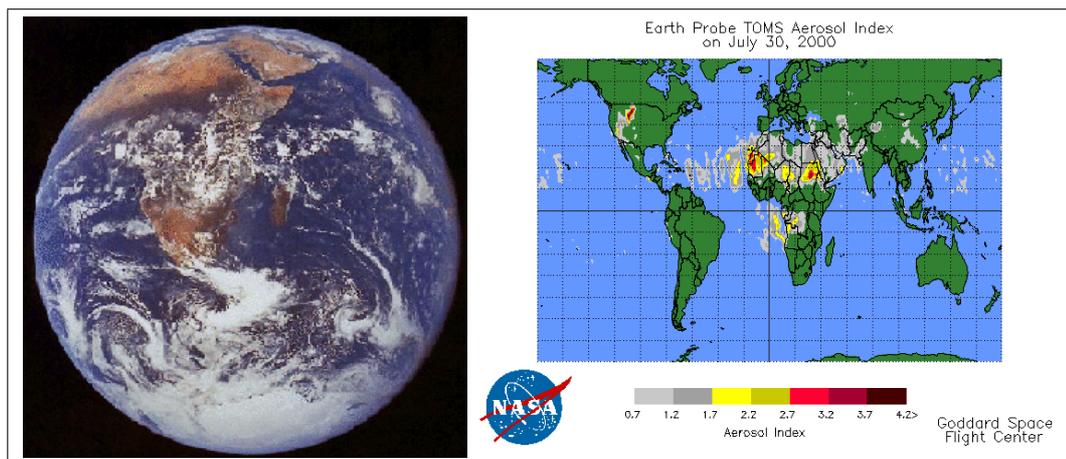


Figura 1.2: Esfera terrestre y proyección

Geodesia es la ciencia que estudia la forma y tamaño de la Tierra y las posiciones sobre la misma. La Geodesia define el geoide como una superficie en la que todos sus puntos experimentan la misma atracción gravitatoria siendo esta equivalente a la experimentada al nivel del mar. Debido a las diferentes densidades de los materiales que componen la corteza y el manto terrestre y a alteraciones debidas a los movimientos isostáticos, esta superficie no es regular sino que contiene ondulaciones que alteran los cálculos de localizaciones y distancias.

Debido a esta irregularidad de la superficie terrestre, para describir la forma de la Tierra suelen utilizarse **modelos** de la misma denominados **esferoides o elipsoides de referencia**. Estos se definen mediante dos parámetros, el tamaño del semieje mayor (a) y el tamaño del semieje menor (b) (figura ??). El achatamiento del esferoide se define entonces mediante un coeficiente como:

$$f = (a - b)/a \quad (1.1)$$

El achatamiento real de la Tierra es aproximadamente de $1/300^4$. Alterando los valores de los coeficientes a y b se obtienen diferentes elipsoides. Se han propuesto diversos elipsoides de referencia, generalmente se conocen con el nombre de su creador. La razón de tener diferentes esferoides es que ninguno de ellos puede adaptarse completamente a todas las irregularidades del Geoide, aunque cada uno de ellos se adapta razonablemente bien a una zona concreta de la superficie terrestre. Por tanto en cada país se utilizará el más conveniente en función de la zona del planeta en que se encuentre ya que el objetivo fundamental de un elipsoide es asignar a cada punto de la superficie del país donde se utiliza, un par de coordenadas geográficas, también llamadas coordenadas angulares.

La figura ?? muestra como el elipsoide (definido por los parámetros a y b) es un modelo del Geoide, pero para poder asignar coordenadas geográficas a los diferentes puntos de la superficie terrestre es necesario “anclar” el

⁴Es decir mucho menos de lo que la figura ?? y muchas imágenes que aparecen en textos de bachillerato pueden hacernos creer

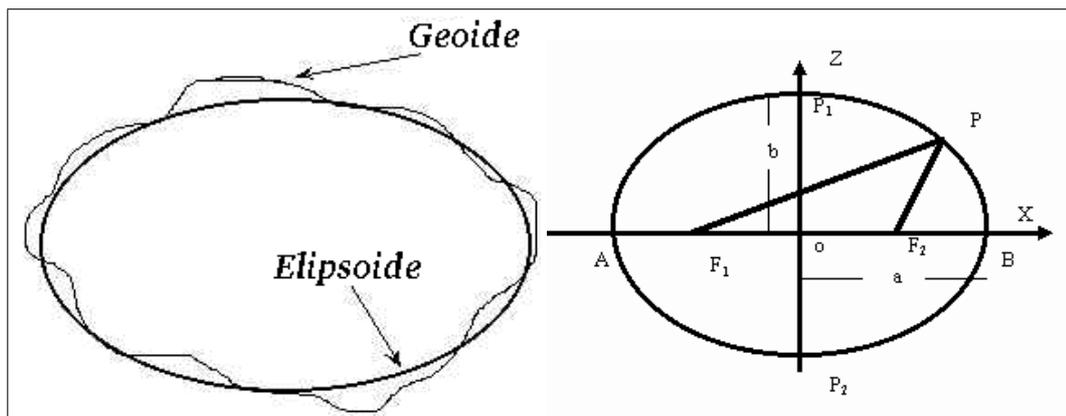


Figura 1.3: Esferoide y Geoide

elipsoide al Geoide mediante un **Punto Fundamental** en el que el elipsoide y el Geoide son tangentes (punto verde en las figuras ?? C y D). De este modo el elipsoide se convierte en un sistema de referencia de la esfera terrestre.

Surge el concepto de *datum* que es el conjunto formado por los parámetros a y b del elipsoide, las coordenadas geográficas, latitud y longitud (λ y ω), del punto fundamental y la dirección que define el Norte (figura ??C). Por ejemplo el datum europeo tiene como elipsoide de referencia el de Hayford, también llamado Internacional de 1924, y como punto fundamental Postdam (Alemania). Los parámetros de este datum serían

- $a=6378388$
- $b=6356911.946$
- Punto fundamental: $\lambda = 13^{\circ}03'58,741'' E$; $\omega = 52^{\circ}22'51,446'' N$
- La dirección de referencia la definen los meridianos y se dirige hacia el Norte magnético

Establecer cual es el datum de un sistema de coordenadas es tarea de los servicios nacionales de geodesia. En España, el datum utilizado tradicionalmente en cartografía, tanto en los mapas del Servicio Geográfico del Ejército (SGE) como en los del Instituto Geográfico Nacional (IGN), es el Europeo. Este puede ser el de 1950 si el mapa esta **formado** (información que se obtiene en la letra pequeña del margen del mapa) antes o durante 1979 o el europeo de 1979, si el mapa esta formado después de este año.

Hasta la segunda mitad del siglo XX, el propósito de los diferentes datums era servir como modelo del Geoide en porciones reducidas de la superficie terrestre a las que se adaptaban especialmente bien. Hoy en día la necesidad de estudios globales y la disponibilidad de dispositivos de toma de datos también globales (**GPS**⁵,

⁵Sistema de Posicionamiento Global. Se trata de un sistema de satélites con los que se puede contactar desde un pequeño dispositivo situado en Tierra, conociendo la posición de los satélites el dispositivo puede calcular por triangulación su posición sobre el planeta con aproximación incluso centimétrica

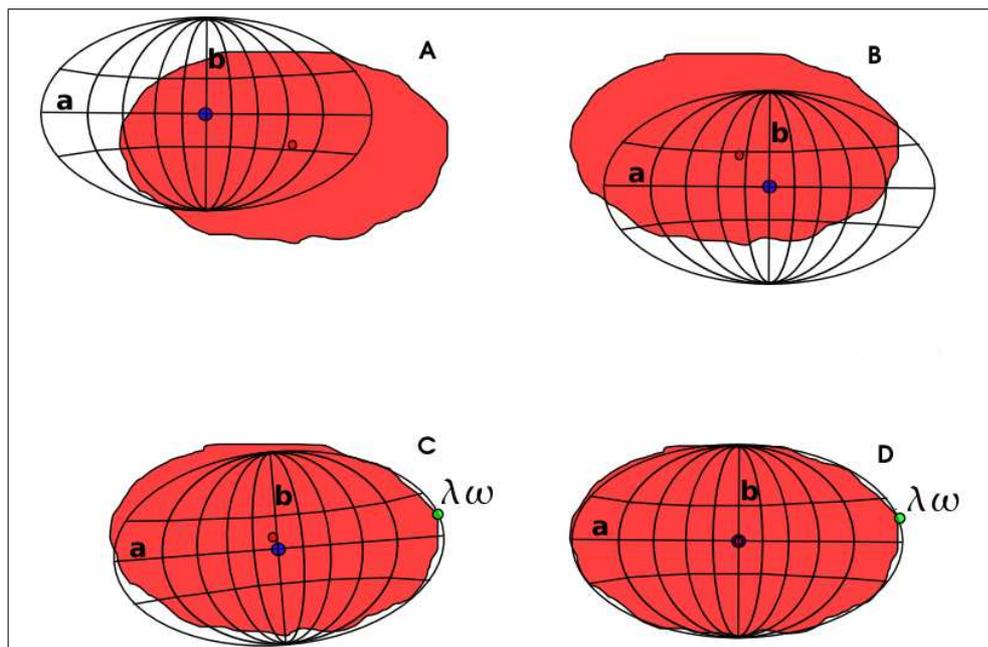


Figura 1.4: Parámetros que definen un Datum

teledetección), se busca que los datum tengan validez para todo el planeta, de forma que puedan tener empleo mundial, como el datum WGS-84 que suelen utilizar los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Para ello se hace necesario un parámetro más que sería la distancia del centro del elipsoide con respecto al centro de masas de la Tierra (punto rojo en la figura ?? D).

Por tanto si se van a combinar en un SIG datos procedentes de mapas topográficos (datum europeo) con posiciones tomadas con GPS (datum WGS-84) es necesario establecer la correspondencia entre ambos. Las posiciones tomadas con GPS deberán ser desplazadas 0.07 minutos al Norte y 0.09 minutos al Este.

Las diferencias más importantes entre elipsoide y geoide serán en altura, en la figura ?? se aprecian las diferencias de altitud entre el elipsoide WGS-84 y el Geoide.

Visto todo lo anterior, resulta evidente que dar un par de coordenadas sin hacer referencia al datum no es lo suficientemente preciso. En un datum todo punto tiene un par de coordenadas único, mientras que el mismo punto tendrá diferentes coordenadas en diferentes datums, o lo que es lo mismo un par de coordenadas puede corresponder a diferentes puntos en diferentes datums.

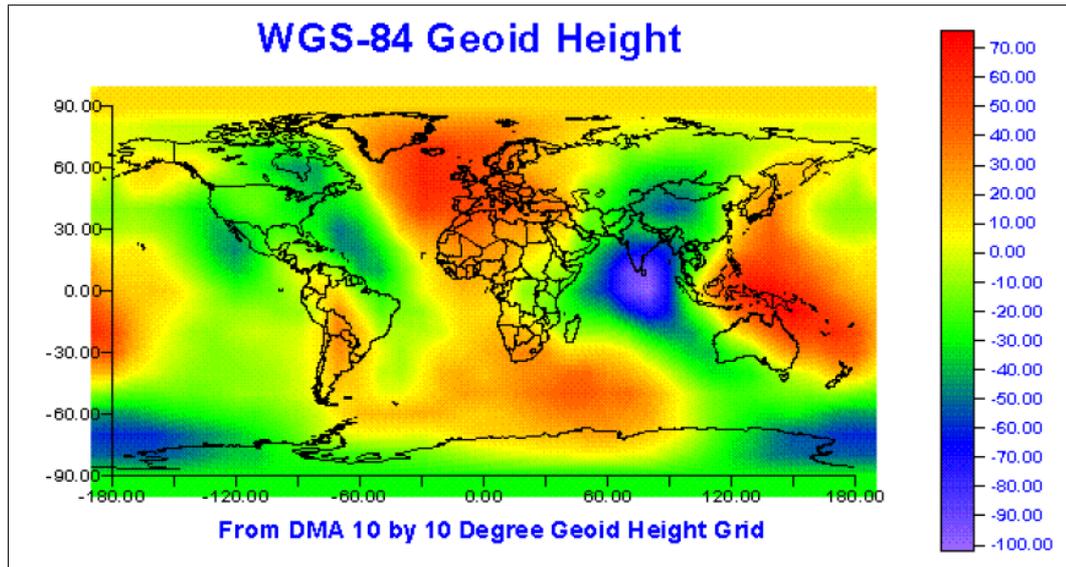


Figura 1.5: Diferencia entre Esferoide y Geoide

1.2. Coordenadas geográficas

El sistema de coordenadas natural de un esferoide, y por tanto de un datum, es el de coordenadas angulares (latitud y longitud) que suele denominarse de **coordenadas geográficas** (figura ??). Para definir latitud y longitud, debemos identificar el eje de rotación terrestre. El plano perpendicular al eje de rotación que corta la Tierra atravesándola por su centro define el **Ecuador** en su intersección con el esferoide. El resto de las líneas de intersección con la superficie terrestre de los infinitos planos perpendiculares al eje de rotación definen los diferentes **paralelos** o líneas de latitud constante. Finalmente, los **meridianos** pueden definirse como las líneas de intersección con la superficie terrestre de los infinitos planos que contienen al eje de rotación. Paralelos y meridianos se cruzan siempre en ángulo recto.

La **longitud** (λ) es la distancia angular entre el meridiano de un lugar y el de Greenwich, se expresa en grados, minutos y segundos de arco y se mide de 0 a 180° hacia el Este o hacia el Oeste desde el meridiano de Greenwich. La **latitud** (ω) es la distancia angular entre el paralelo de un lugar y el Ecuador, se expresa en las mismas unidades que la longitud y se mide de 0 a 90° hacia el Norte o el Sur. En ocasiones la latitud y longitud se expresan en grados y décimas de grado en lugar de en grados, minutos y segundos.

Un grado de meridiano equivale siempre a 111 kilómetros, mientras que un grado de paralelo equivale a $111\cos(\omega)$, es decir a 111 kilómetros en el Ecuador disminuyendo hasta 0 kilómetros en los polos⁶.

La localización de un punto P sobre la superficie terrestre puede definirse de este modo mediante estos dos pará-

⁶En realidad un grado de meridiano es ligeramente menor en el Ecuador (110.6 km) que en los polos (111.7 km) debido al achatamiento de la Tierra y, por tanto, de los elipsoides

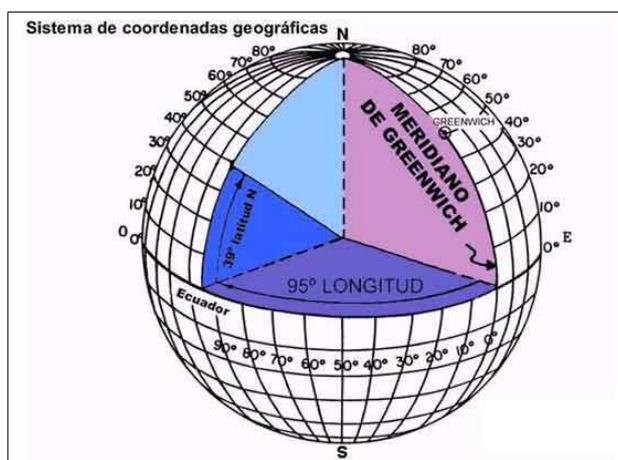


Figura 1.6: Sistema de coordenadas geográficas

metros. La ciudad de Murcia está, asumiendo el datum europeo, situada en $\lambda = 1^{\circ}03'27''W$ y $\omega = 1^{\circ}03'27''N$. La letra W indica al oeste del meridiano de Greenwich y la letra N al Norte del Ecuador.

Latitud y longitud definen, por tanto, la posición de un punto sobre el esferoide de referencia del datum que se esté utilizando. Se considera que la superficie del esferoide coincide con el nivel del mar, así la distancia entre la superficie del esferoide y la superficie terrestre en un punto cualquiera es su altitud.

Las coordenadas de un hipotético rectángulo que enmarcara a España (excluyendo las islas Canarias) serían, en grados en grados y décimas de grado:

- N: 43.80 N
- S: 35.82 S
- E: 4.33 E
- O: 9.29 O⁷

En muchos cálculos con coordenadas y especialmente en aplicaciones informáticas para cartografía, las coordenadas Oeste se codifican con números negativos.

1.3. Direcciones

Existen dos formas básicas de definir la dirección entre dos puntos sobre un elipsoide:

⁷En ocasiones el Oeste se codifica con su inicial inglesa (W)

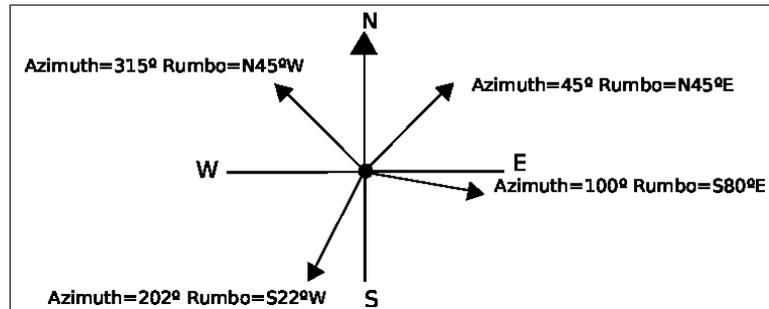


Figura 1.7: Medición de azimuths y rumbos sobre un mapa

- *Azimuth*: Es el ángulo formado por la línea que une el punto de partida y el Norte y la línea que une el punto de partida con el de llegada. Se expresa en ángulos medidos en el sentido de las agujas del reloj desde la dirección Norte. Varía entre 0 y 360 (figura ??).
- *Rumbo*: Es el ángulo agudo que forman las direcciones Norte o Sur desde el punto de partida y la línea que une ambos puntos. Varía entre 0 y 90, se precede por una letra, N o S, en función de cual sea la dirección de referencia y se termina con otra que hace referencia a la dirección (E o W) a la que se dirige el ángulo (figura ??).

Un concepto básico en cartografía y geodesia es el de Norte, sin embargo existen hasta cuatro nortes diferentes:

- Norte astronómico, definido por la estrella polar
- Norte magnético
- Norte geodésico
- Norte de la malla

Los dos primeros varían con el tiempo, especialmente el segundo que puede llegar a variar entorno a 25 Km/año. Los dos segundos son artificiales, el Norte geodésico depende del elipsoide utilizado y el segundo de la proyección que se utilice para pasar de coordenadas geográficas a coordenadas cartesianas a la hora de confeccionar el mapa.

1.4. Proyecciones

El proceso de transformar las coordenadas geográficas del esferoide en coordenadas planas para representar una parte de la superficie del elipsoide en dos dimensiones se conoce como **proyección** y es el campo de estudio tradicional de la **ciencia cartográfica**. La aparición de los SIG y la posibilidad de combinar información de

diferentes mapas con diferentes proyecciones ha incrementado la relevancia de la cartografía más allá de la mera confección de mapas.

El problema fundamental a la hora de abordar una proyección es que no existe modo alguno de representar en un plano toda la superficie del elipsoide sin deformarla, el objetivo va a ser minimizar, en la medida de lo posible, estas deformaciones. Puesto que el efecto de la esfericidad de la superficie terrestre es proporcional al tamaño del área representada (y en consecuencia a la escala), estos problemas sólo se plantean al cartografiar zonas amplias. Cuando se trata de cartografiar zonas pequeñas, por ejemplo una ciudad, la distorsión es despreciable por lo que se suelen utilizar coordenadas planas, relativas a un origen de coordenadas arbitrario y medidas sobre el terreno. A estas representaciones se les llama **planos** en lugar de **mapas**.

Cuando la distorsión debida a la esfericidad de la superficie terrestre se considera relevante se hace necesario buscar una ecuación que a cada par de coordenadas geográficas le asigne un par de coordenadas planas de manera que los diferentes elementos y objetos de la superficie terrestre puedan ser representados sobre un plano⁸. Las unidades en que se expresa la longitud en estas nuevas coordenadas va a ser generalmente el metro, permitiendo, de cara a la incorporación de la cartografía UTM a un SIG, el cálculo sencillo de variables de longitud, área o volumen de los elementos cartografiados expresados en unidades del Sistema Internacional.

Estas ecuaciones son de la forma:

$$x = f_1(\omega, \lambda) \quad (1.2)$$

$$y = f_2(\omega, \lambda) \quad (1.3)$$

Para obtener estas ecuaciones se proyecta (figura ??) la porción de la superficie terrestre que va a cartografiarse sobre una figura geométrica (un cilindro, un cono o un plano) que si puede transformarse en plano sin distorsiones. El foco de la proyección puede ubicarse en diferentes puntos dando lugar a diferentes tipos de proyecciones. De este modo podemos clasificar las proyecciones en función del objeto geométrico utilizado para proyectar (figura ??), se habla entonces de proyecciones **cilíndricas, cónicas y azimutales o planas**.

En el caso de proyecciones cilíndricas o cónicas, la figura envuelve al elipsoide y, tras desenvolverla, el resultado será un plano en el que una parte de la Tierra se representan mediante un sistema de coordenadas cartesiano. En el caso de las proyecciones planas, el plano es tangente al elipsoide en un punto y no necesita por tanto ser desnuelto.

Una proyección implica siempre una distorsión en la superficie representada, el objetivo de la cartografía es minimizar estas distorsiones utilizando la técnica de proyección más adecuada a a cada caso. Las propiedades del elipsoide que pueden mantenerse son:

- **Conformidad.** Si un mapa mantiene los ángulos que dos líneas forman en la superficie terrestre, se dice que la proyección es conforme. El requerimiento para que haya conformidad es que en el mapa los meridianos y los paralelos se corten en ángulo recto y que la escala sea la misma en todas las direcciones

⁸Es importante no confundir el concepto matemático de plano con el plano entendido como mapa de una zona reducida realizado con coordenadas arbitrarias

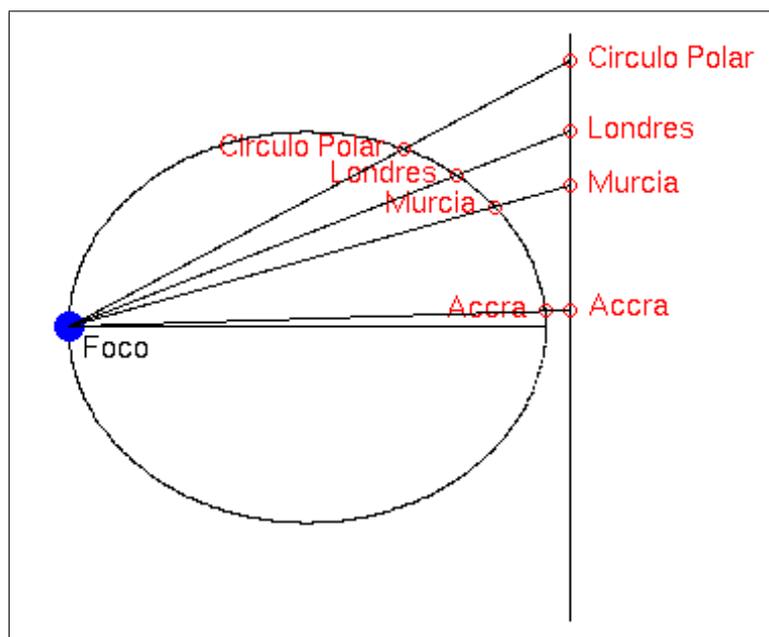


Figura 1.8: Proyección cartográfica

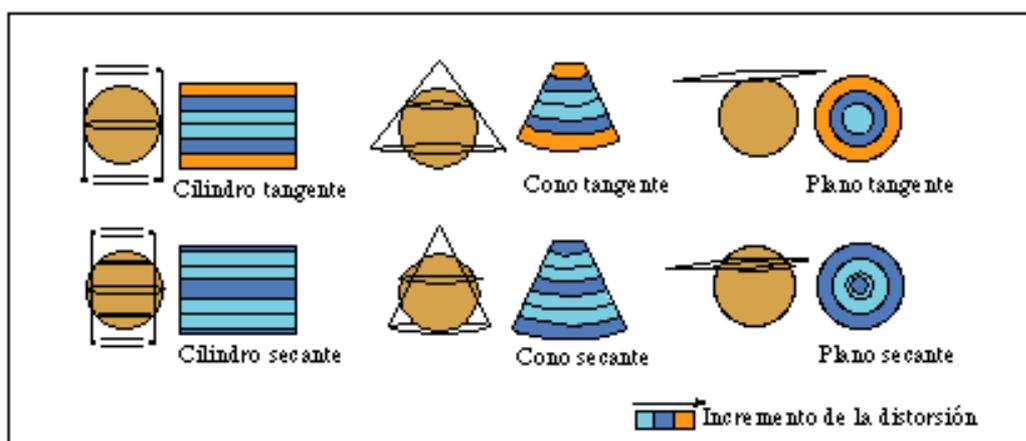


Figura 1.9: Tipos de proyecciones

alrededor de un punto, sea el punto que sea. Una proyección conforme mantiene además las formas de polígonos pequeños. Se trata de una propiedad fundamental en navegación.

- **Equivalencia**, es la condición por la cual una superficie en el plano de proyección tiene la misma superficie que en la esfera. La equivalencia no es posible sin deformar considerablemente los ángulos originales, por lo tanto, ninguna proyección puede ser equivalente y conforme a la vez. Resulta conveniente por ejemplo en planos catastrales.
- **Equidistancia**, cuando una proyección mantiene las distancias reales entre dos puntos situados sobre la superficie del Globo (representada por el arco de Círculo Máximo que las une).

Como se puede ver en la figura ??, las distorsiones son nulas en la línea donde la figura geométrica toca al elipsoide y aumentan a medida que la separación entre ambas aumenta. Por tanto para minimizar el error medio suelen utilizarse planos secantes en lugar de planos tangentes. De esta manera en lugar de tener una sola línea del elipsoide tangente a la figura tenemos dos líneas secantes y las distancias a las mismas, y por tanto los errores, nunca aumentarán mucho. Así otro criterio para clasificar sistemas de proyección sería en proyecciones secantes y tangentes.

1.4.1. Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)

La proyección UTM es una de las más conocidas y utilizadas, entre otros lugares en España. Se trata de una proyección cilíndrica transversa (la generatriz del cilindro no es paralela al eje de rotación sino perpendicular) tal como se ve en la figura ?. La Tierra se divide en 60 *husos*, con una anchura de 6 grados de longitud, empezando desde el meridiano de Greenwich (figura ?). Se define un *huso* como las posiciones geográficas que ocupan todos los puntos comprendidos entre dos meridianos. A pesar de que se ha utilizado en casi toda la cartografía española, introduce un grave problema debido a que la Península Ibérica queda situada sobre tres husos, el 29, el 30 y el 31, estos últimos situados uno a cada lado del meridiano de Greenwich (figuras ? y ?).

La representación cartográfica en cada huso se genera a partir de un cilindro diferente siendo cada uno de ellos secante al elipsoide. De esta manera en cada huso aparecen dos líneas verticales en las que no hay distorsiones (líneas A-D y C-F en la figura ?), entre estas dos líneas las distorsiones disminuyen la escala (distancias y áreas se representan menores de lo que son) hacia fuera de las líneas las distorsiones aumentan la escala (distancias y áreas se representan mayores de lo que son). Estas distorsiones tienden a incrementarse conforme se aumenta en latitud por lo que la proyección UTM no debe usarse en latitudes altas y suele reemplazarse por proyecciones azimutales polares en las que el plano es tangente al elipsoide en el polo correspondiente.

En cada uno de los husos el meridiano central tiene siempre un valor $X = 500000$ metros disminuyendo hacia el Oeste (hasta 0) y aumentando hacia el Este (hasta 1000 Km). En el Ecuador $Y = 0$ metros, incrementándose el valor hacia el Norte y hacia el Sur. Los valores de la coordenada X en los bordes del huso dependen de la latitud (figura ?). Este hecho trae dos complicaciones:

- Dos puntos diferentes de la superficie terrestre pueden tener las mismas coordenadas si se sitúan en husos diferentes. Por tanto a la hora de señalar con precisión la localización de un punto, no basta con el par de coordenadas, es necesario dar también el huso.

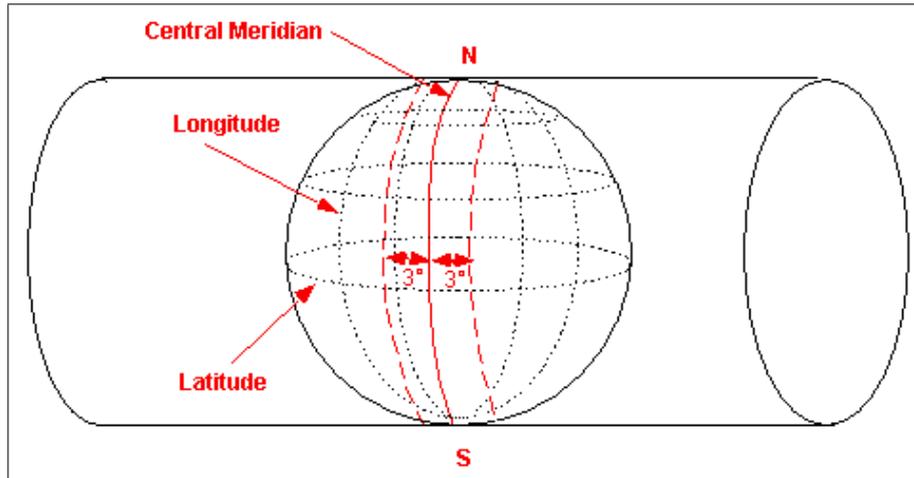


Figura 1.10: Cilindro generador de la proyección UTM

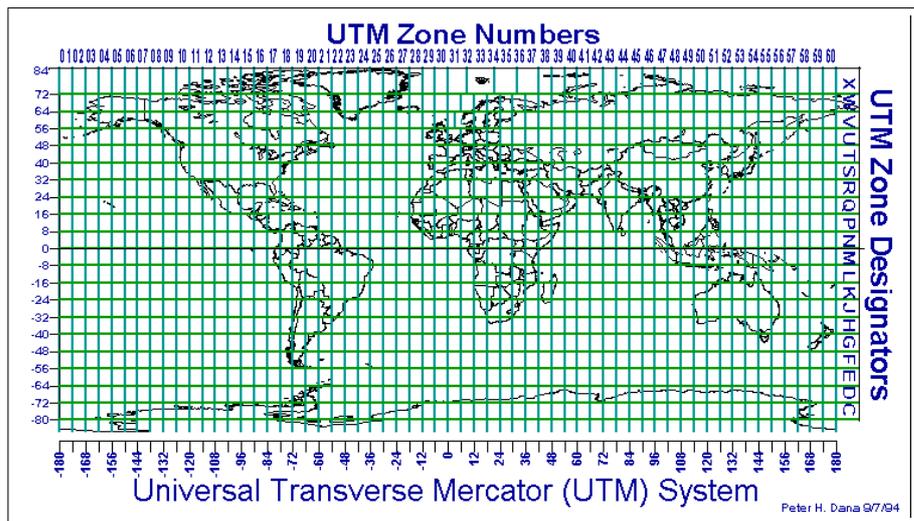


Figura 1.11: Zonas UTM

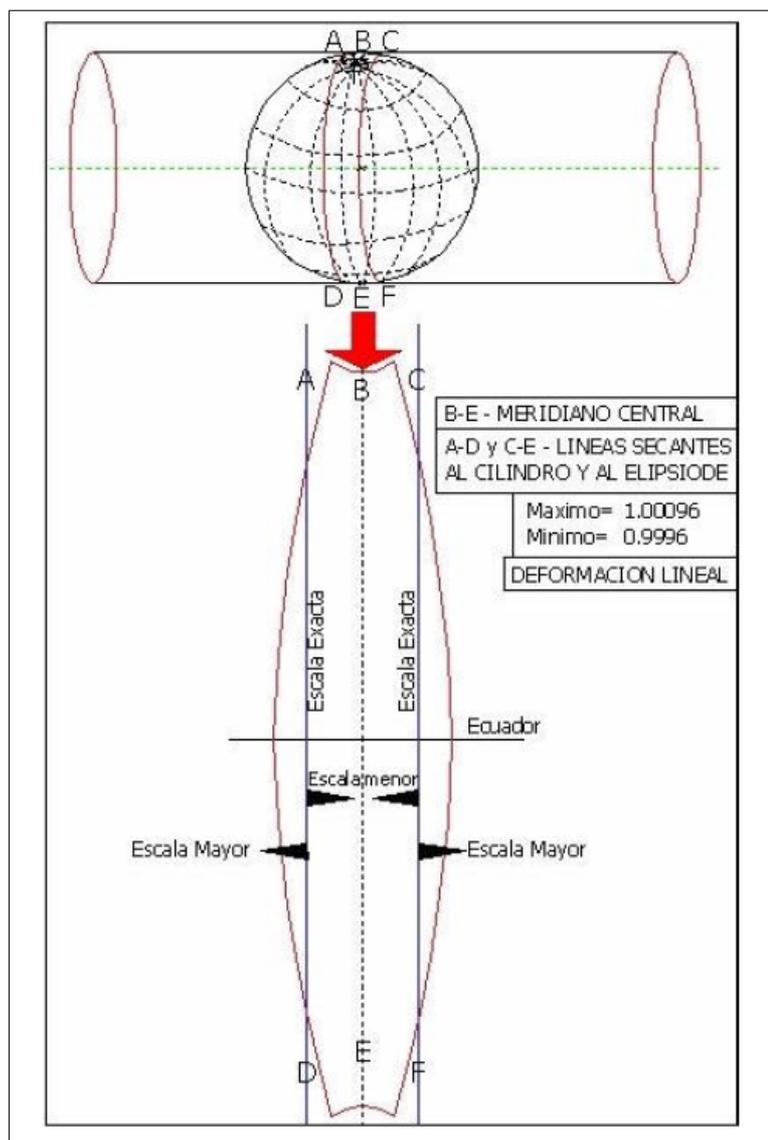


Figura 1.12: Deformaciones en un huso UTM debido a que el cilindro es secante al esferoide

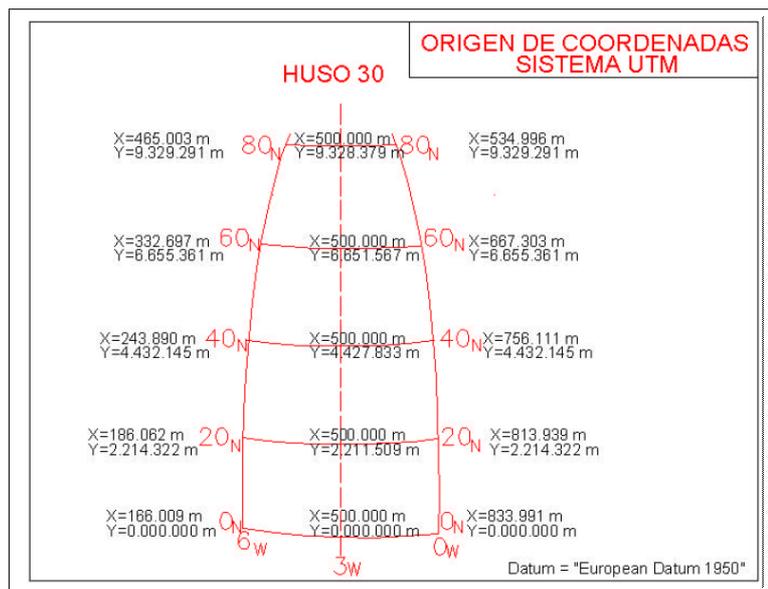


Figura 1.13: Coordenadas UTM y coordenadas geográficas en un huso UTM

- Una región situada a caballo entre dos husos deberá optar por uno u otro con lo que se incrementan las deformaciones. De hecho la cartografía española se genera asumiendo que toda la Península se sitúa en el huso 30 por lo que las deformaciones hacia los extremos Este y Oeste son mayores alcanzándose un 4 % de distorsión lineal. En el caso de la Región de Murcia, esta se sitúa en una de las zonas de menor distorsión (figura ??).

La Región de Murcia se sitúa en el huso 30 con coordenadas UTM que oscilan entre

- Oeste: 552411 m
- Este: 709600 m
- Norte: 4293125 m
- Sur: 4134906 m

Las coordenadas UTM suelen expresarse en metros o kilómetros, siendo preferible hacerlo en metros en aplicaciones SIG para evitar la aparición de decimales. En los mapas del IGN a escala 1:50000 y 1:25000 y del Servicio Geográfico del Ejército a escala 1:50000, los valores de las coordenadas X e Y UTM suelen expresarse en kilómetros. Como resultado de emplear un sistema de coordenadas plano, puede representarse sobre el mapa una malla que represente las líneas con igual coordenada X o igual coordenada Y. La malla se representa, en los mapas antes mencionados, con una separación de 1 kilómetro (figura ??).

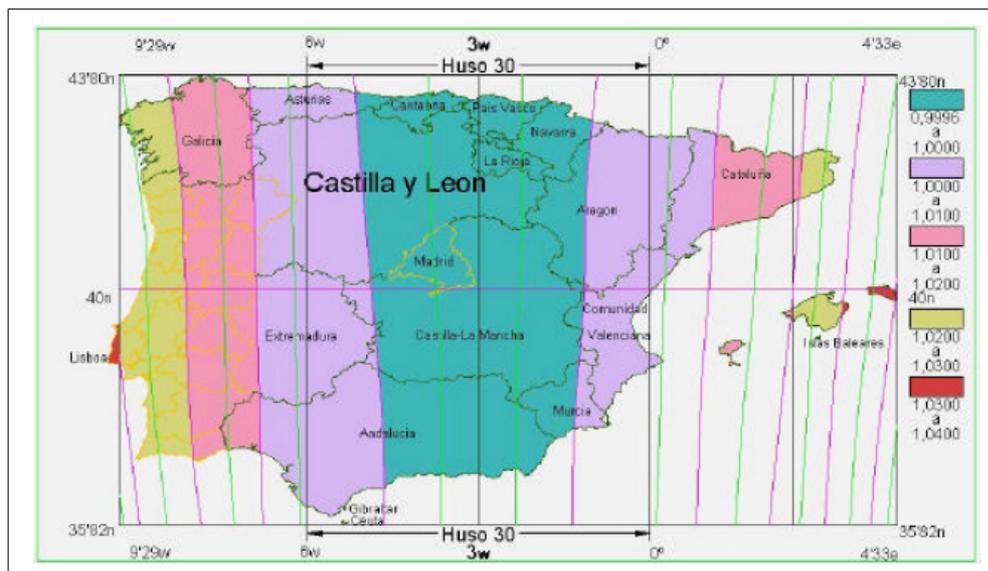


Figura 1.14: Distorsiones en coordenadas UTM en la Península Ibérica

1.5. La representación de los elementos de la superficie terrestre

Resumiendo mucho lo visto hasta ahora, un datum, asigna a cada punto sobre el Geoide un par de coordenadas angulares único y un sistema de proyección adjudica a cada uno de estos pares de coordenadas angulares un par de coordenadas cartesianas para su representación en un plano. El siguiente problema que debe resolverse en cartografía es como representar, sobre este plano, la variedad de fenómenos que tienen lugar sobre la superficie terrestre.

1.5.1. Fenómenos en el espacio, variables, entidades y eventos

De modo general pueden distinguirse tres tipos de fenómenos:

- *Variables espaciales*, son aquellas que adoptan un valor diferente en diferentes puntos del espacio, muestran siempre un cierto grado de autocorrelación espacial. Estas variables
 - *Binomiales*. Sólo tienen dos valores, suelen indicar presencia/ausencia o pertenencia/no pertenencia, por ejemplo la variable pertenencia a la Región de Murcia.
 - *Cualitativas o nominales*. Indican una cualidad no mensurable. Por ejemplo la litología, usos del suelo, etc.
 - *Semicuantitativas u ordinales*. Se trata de variables cualitativas pero que pueden ordenarse atendiendo a algún criterio. Por ejemplo el tipo de carretera a la que pertenezca un tramo de la red,

tipos de roca ordenados por su erosionabilidad, clases de pendiente. Suelen representarse mediante números naturales a los que se asocia una etiqueta de texto descriptiva.

- *Cuantitativas*: Son variables mensurables que pueden adoptar cualquier valor (variables continuas como altitud, temperatura, precipitación, pH del suelo, etc.) o sólo determinados valores (variables discretas como el número de días de lluvia o el número de habitantes de un municipio). Las variables cuantitativas suelen representarse mediante números reales (continuas) o enteros (discretas). Una variable continua puede convertirse en discreta por su forma de medirse y registrarse, por ejemplo si la precipitación se mide en décimas de milímetro, sólo podrá adoptar valores enteros ya que los aparatos de medición no suelen permitir mayor precisión. Las variables cuantitativas suelen presentar autocorrelación espacial, es decir cuanto más cercanos sean dos puntos sus valores van a ser más parecidos.
- *Entidades*
 - *Puntuales* (pozos, cotas, puntos de observación, etc.)
 - *Lineas* (carreteras, redes fluviales, etc.)
 - *Polígonos* (entidades administrativas, ciudades, cuencas hidrográficas, etc.)
- *Eventos* se trata de fenómenos que aparecen en intervalos concretos de tiempo sobre un área finita del espacio (incendios, inundaciones, etc.). Por su carácter no permanente, no suelen representarse en cartografía, salvo en mapas creados con aplicaciones muy específicas como el estudio de la distribución y extensión espacial de estos fenómenos o el riesgo asociado a ellos.

1.5.2. Escala y representación de entidades

El primer problema que se plantea cuando se pretende representar los diferentes fenómenos que aparecen sobre la superficie terrestre es la reducción del espacio de trabajo que supone un mapa. Se trata de representar algo que abarca una superficie relativamente amplia sobre una hoja de papel. La relación matemática entre las dimensiones del espacio representado y las dimensiones de su representación sobre el mapa es la *escala* del mismo que se calcula como el índice entre una distancia sobre el mapa y su equivalente en la realidad. Por ejemplo una escala de $1/50000$ implica que cada centímetro en el mapa corresponde a $50,000\text{cm} = 0,5\text{Km}$ en la realidad. Puesto que la escala es una división, cuanto mayor sea el denominador menor es la escala y viceversa⁹.

Salvo en mapas de muy alta escala (1:1000 y superior), que generalmente son planos y no mapas, resulta imposible la representación exacta de entidades. En realidad las entidades puntuales o lineales son muchas veces polígonos (un pozo es un círculo y una carretera tiene anchura) pero generalmente pueden y deben representarse como puntos o líneas debido a la escala del mapa. Por ejemplo un camino de tres metros de ancho debería tener, en un mapa a escala 1:50000, una anchura de 0.06 milímetros lo que resulta imposible de representar. Por tanto el proceso de representación en un mapa implica una *generalización*, es decir la pérdida

⁹Al revés de cuando se habla de *estudios a gran escala o pequeña escala* de una forma genérica

de detalles no significativos, e incluso la simbolización o iconificación de entidades como figuras geométricas, para conseguir transmitir la información sobre el espacio sin saturar al usuario del mapa.

La escala impone por tanto un *tamaño mínimo* que debe tener un objeto para ser representado, este tamaño mínimo es de alrededor de 0.15 mm sobre el mapa. Por tanto para determinar el tamaño mínimo del objeto en unidades del terreno basta con aplicar una regla de tres, por ejemplo en un mapa a escala 1 : 50000:

$$\begin{array}{l} 1 \quad \text{mm} \quad \text{----} \quad 50000 \quad \text{mmm} \\ 0.15 \quad \text{mm} \quad \text{----} \quad X \end{array}$$

$$X = 50000 \times 0.15 = 7500 \text{ mm} = 7.5 \text{ m}$$

Además en muchos casos, la representación de determinadas entidades en el mapa como puntos o como polígonos va a depender más de la *escala* del mapa que de la propia naturaleza de la entidad representada. Por ejemplo un pozo es un polígono pero casi siempre se representará como un punto, lo mismo ocurre con una ciudad si la escala es pequeña.

1.5.3. Elementos de representación cartográfica

A cada entidad espacial se puede asociar diversas variables (binomiales, cualitativas, ordinales o cuantitativas). Por ejemplo, a una carretera se puede asociar su anchura, categoría o flujo de vehículos; a un municipio población, renta, etc.; a un pozo la cantidad de agua extraída al año, el nivel del agua o su composición. Normalmente al representar una entidad se representará también alguna de las variables asociadas a ella.

El conjunto de ciencias involucradas en la producción de mapas (Geodesia, Cartografía, Geografía, Geología, Ecología, etc.) han desarrollado un amplio conjunto de técnicas para cartografiar los hechos de la superficie terrestre.

- **Isolneas.** Son líneas que unen puntos con igual valor, sirven por tanto para cartografiar variables cuantitativas. Un buen ejemplo son las curvas de nivel del mapa topográfico o las isobaras de los mapas del tiempo.
- **Coropletas.** Áreas con valor comprendido entre dos umbrales y pintadas con un color homogéneo. Permiten representar variables cuantitativas de un modo más simplificado.
- **Símbolos** para indicar la presencia de entidades de un modo puntual. Pueden representarse utilizando diferentes símbolos o colores para representar una variable cualitativa (por ejemplo el partido gobernante), o diferentes tamaños para representar variables cuantitativas (por ejemplo el número de habitantes).
- **Líneas** que simbolizan entidades, naturales o artificiales, de forma lineal (carreteras, ríos). Pueden utilizarse diferentes anchuras de línea, diferentes colores o diferentes tipos de línea para representar propiedades como la anchura de los ríos o categorías de vías de comunicación.

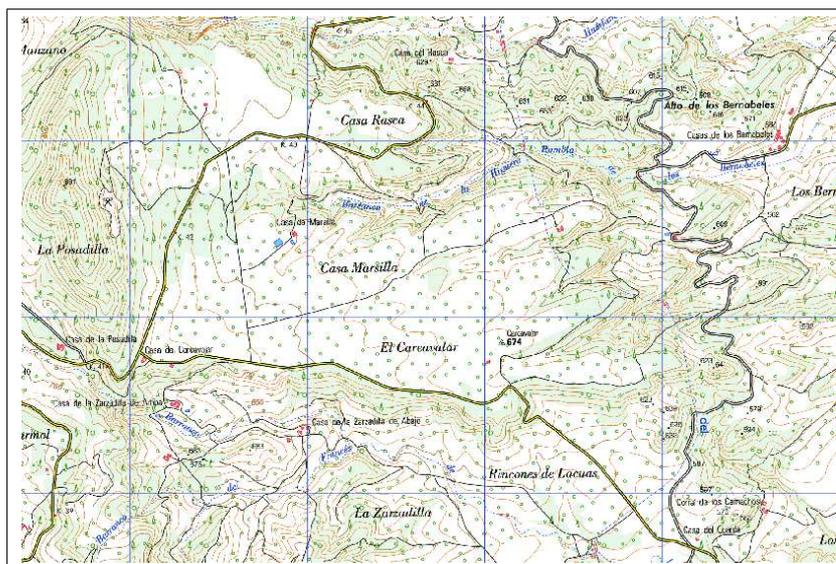


Figura 1.15: Mapa topográfico escala 1:25000

- Polígonos** representan objetos poligonales que, por su tamaño, pueden ser representados como tales (siempre dependiendo de la escala del mapa) o porciones homogéneas del terreno en relación a una variable cualitativa (tipo de roca). Pueden utilizarse diferentes colores o tramas para representar variables cualitativas o cuantitativas, por ejemplo en un mapa de municipios se puede representar la población municipal mediante sombreados.

En cartografía, suele distinguirse entre mapas topográficos, considerados de propósito general, y mapas temáticos (geológicos, vegetación, etc.) que reflejan un sólo aspecto de la realidad. Los mapas, especialmente los topográficos (figura ??), tratan de reflejar el máximo número de elementos potencialmente interesantes para el usuario, evitando llegar a confundirle por exceso de información. Una de las estrategias empleadas para ello es eliminar parte de la información (por ejemplo una curva de nivel que cruza una población) confiando en que la capacidad de nuestro cerebro para reconstruir objetos a partir de información parcial. Esta estrategia se denomina generalización.

De este modo un mapa deja en ocasiones de ser un modelo de la superficie terrestre para ser una representación visual que incluye información variada y no totalmente estructurada.

1.6. Concepto de espacio

La cartografía constituye un medio de representación tanto de los objetos situados en el espacio geográfico como del mismo espacio, por tanto merece la pena prestar algo de atención a la propia naturaleza de este. El

espacio ha sido el objeto de estudio, aunque desde puntos de vista diferentes, de disciplinas muy dispares: la Filosofía desde un punto de vista puramente conceptual; las Matemáticas utilizando un lenguaje formal para describirlo; la Física desde un punto de vista teórico; mientras que la Geografía finalmente lo ha hecho de manera más empírica.

Las disquisiciones filosóficas y físicas acerca del espacio pueden resumirse en la controversia entre la concepción de un espacio como “contenedor neutro” de los fenómenos dispuestos en él (Descartes, Newton) o como algo sin existencia propia que surge del ensamblamiento de estos mismos fenómenos (concepción de Leibnitz o Einstein). Por otro lado está el debate acerca de si tanto el espacio como el tiempo son entidades reales o, como sostienen Kant y los neokantianos, constructos de la mente humana para organizar la información procedente de los sentidos.

Desde un punto de vista matemático, se han definido diversos tipos de espacio, En primer lugar puede distinguirse entre *espacios métricos* y no métricos. Los primeros son aquellos en los que puede establecerse una medida de distancia a partir de la que pueden deducirse diversas *propiedades métricas* (área, perímetro, forma, etc.), pudiendo utilizarse diversas definiciones de distancia:

- Distancia euclídea, responde al concepto tradicional de distancia como hipotenusa de un triángulo rectángulo. Es la más utilizada para resolver problemas geoespaciales:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j})^2} \quad (1.4)$$

- Distancia de Manhattan, corresponde, siguiendo con el símil del triángulo rectángulo, a la suma de los catetos. Resulta útil en aplicaciones muy concretas como por ejemplo en estudios de ciudades:

$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^N |x_{k,i} - x_{k,j}| \quad (1.5)$$

- Distancia como distancia máxima, corresponde a la longitud del cateto más largo

$$d_{i,j} = \max_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j}) \quad (1.6)$$

Los espacios métricos deben cumplir una serie de condiciones:

- Simetría: $d(A, B) = d(B, A)$
- $d(A, B) \leq d(A, C) + d(B, C)$

Existen espacios no métricos que pueden resultar de interés trabajando con SIG, por ejemplo el tiempo necesario para recorrer el espacio entre dos puntos¹⁰ o los *espacios topológicos* con el que se estudian las propiedades

¹⁰que no cumple la propiedad simétrica ya que no se tarda lo mismo en ir de Murcia a la Cresta del Gallo que viceversa

de los objetos que son invariantes a transformaciones topológicas del espacio consistentes en estiramientos o acortamientos similares a los que hace un panadero con la masa de pan (las propiedades métricas sí serían modificadas por estas transformaciones). Estas *propiedades topológicas* son:

- Estar dentro-fuera
- Estar a la derecha o a la izquierda
- Estar en contacto

Estas propiedades resultan de gran interés en el trabajo con sistemas de información geográfica.

Finalmente, el espacio geográfico, es decir el que procede de una aproximación empírica al mundo real, es un espacio euclideo de 3 dimensiones, aunque su representación suele ser una proyección bidimensional.

1.7. Generalización en cartografía convencional

Por *generalización cartográfica* se entiende la selección y representación simplificada de los elementos de la superficie terrestre con un nivel de detalle apropiado a la escala y el propósito del mapa. El objetivo fundamental es maximizar la información que contiene el mapa y su utilidad limitando su complejidad para garantizar su legibilidad. Cuatro son los propósitos fundamentales de la generalización:

- Disminuir el coste del muestreo necesario para confeccionar el mapa
- Aumentar la robustez del mapa frente a errores de muestreo
- Servir a diversos propósitos, ya que un mapa en el que se representara con mucho detalle un sólo aspecto de la realidad quedaría invalidado para otros propósitos
- Mejorar la visualización de los datos evitando que queden todos apelmazados

1.7.1. Formas de generalización geométrica

La tabla ?? esquematiza los diferentes procedimientos de generalización geométrica y el tipo de objetos a los que se puede aplicar. La figura ?? representa algunos ejemplos.

Como puede verse, normalmente la generalización conlleva la pérdida de detalles, pero en algunos casos implica la introducción artificial de detalles. En el caso de un río que, debido al cambio de escala, quedara como una línea recta sería preferible introducir un meandrizado artificial para darle más apariencia de río.

Método	Puntos	Lineas	Polígonos
Selección	SI	SI	SI
Simplificación y suavizado		SI	SI
Desplazamiento	SI	SI	SI
Agregación	SI		SI
Conversión a punto			SI
Conversión a polígono	SI		
Conversión a línea			SI
Segmentación			SI

Cuadro 1.1: Principales métodos de generalización

1.7.2. Generalización temática

A partir de una base cartográfica común, dependiendo de los objetivos del mapa se incorporará un tipo de información u otra. Por ejemplo para un mapa geológico si que resulta interesante disponer de la topografía en forma de curvas de nivel, sin embargo los usos de suelo no aportan información relevante dado el objetivo del mapa. En un mapa topográfico por el contrario se considera más útil disponer de una representación simplificada de los usos del suelo que una representación de la litología. En ambos casos, esta información se representará en tonos suaves para que no impida una correcta percepción del resto de la información.

Otra forma de generalización es la que se produce cuando distintos objetos, procedentes de capas de información diferentes, se superponen unos con otros en el mapa final. En este caso unas capas tendrán prioridad sobre otras que quedarán ocultas. Por ejemplo las curvas de nivel suelen aparecer como fondo en un gran número de mapas pero, salvo que se trata de un mapa preparado para aplicaciones topográficas, se considera información secundaria, por tanto quedarán ocultas bajo ciudades, carreteras, embalses, etc (un ejemplo puede verse en los mapas geológicos).

En los últimos años, se han empezado a utilizar en la confección de mapas técnicas reprográficas que permiten representar una gran cantidad de información espacial. El usuario, cambiando su ángulo de visión sobre el mapa podrá ver un tipo de información u otra.

1.7.3. Generalización y escala

El grado de generalización suele depender de la escala del mapa. A grandes rasgos pueden establecerse los siguientes umbrales:

- A escala 1:10000 y superior la generalización es muy escasa o inexistente
- A escala 1:20000 empieza a aparecer generalización. Las calles y carreteras aparecen ensanchadas, los edificios se agrupan simplifican y desplazan y las parcelas de cultivo se agrupan en grandes polígonos de uso de suelo

- Entre 1:20000 y 1:200000, los bordes de los polígonos y los objetos lineales se simplifican, las carreteras se simbolizan, desciende considerablemente el número de objetos representados pero aumenta la densidad de objetos en el mapa.
- A partir de 1:500000 el mapa es una representación completamente simbolizada inútil para su integración en un Sistema de Información Geográfica

1.7.4. Generalización y SIG

Cuando se trabaja con cartografía digital es importante separar lo que son los datos espaciales, que deben ser lo más exactos posibles, de su presentación gráfica sometida a generalización (especialmente cuando el objetivo de esta es producir un mapa en papel).

El carácter subjetivo e incluso a veces artístico que muchas veces tiene la generalización cartográfica dificulta enormemente la introducción de funciones de generalización en un SIG o en cualquier otro programa que maneje cartografía digital. Estas deberían compaginarse con las herramientas de producción cartográfica.

En ocasiones la solución que se ha dado a este problema es sustituir los datos originales por datos generalizados con lo que, siendo válidos para su representación en papel, quedan prácticamente inutilizados para su incorporación en un entorno SIG.

1.8. Técnicas de análisis de la cartografía convencional

Las técnicas de análisis que pueden utilizarse con la cartografía en papel son muy básicas, pueden distinguirse dos tipos (figura ??):

- *Medición* de direcciones, distancias y áreas mediante procedimientos manuales (regla y semicírculo) o mecánicos más o menos sofisticados (curvímetros y planímetros)
- Combinación de mapas mediante la técnica de los *transparentes*. Consistente en dibujar los mapas en papel traslúcido y, aplicando luz por detrás, buscar las áreas que cumplen un conjunto de criterios.
- *Muestreo por cuadrículas*, consiste en la superposición de una cuadrícula sobre el mapa asignándole a cada celdilla un valor representativo de determinado fenómeno (por ejemplo la altitud media calculada a partir de las curvas de nivel). De este modo se generan varias capas con diferentes variables que permitirían un análisis de la distribución espacial de las mismas y sus relaciones.

A pesar de que hoy en día puedan parecer técnicas bastante ingenuas fueron muy utilizadas antes de la aparición de los ordenadores y de los primeros programas de cartografía automática.

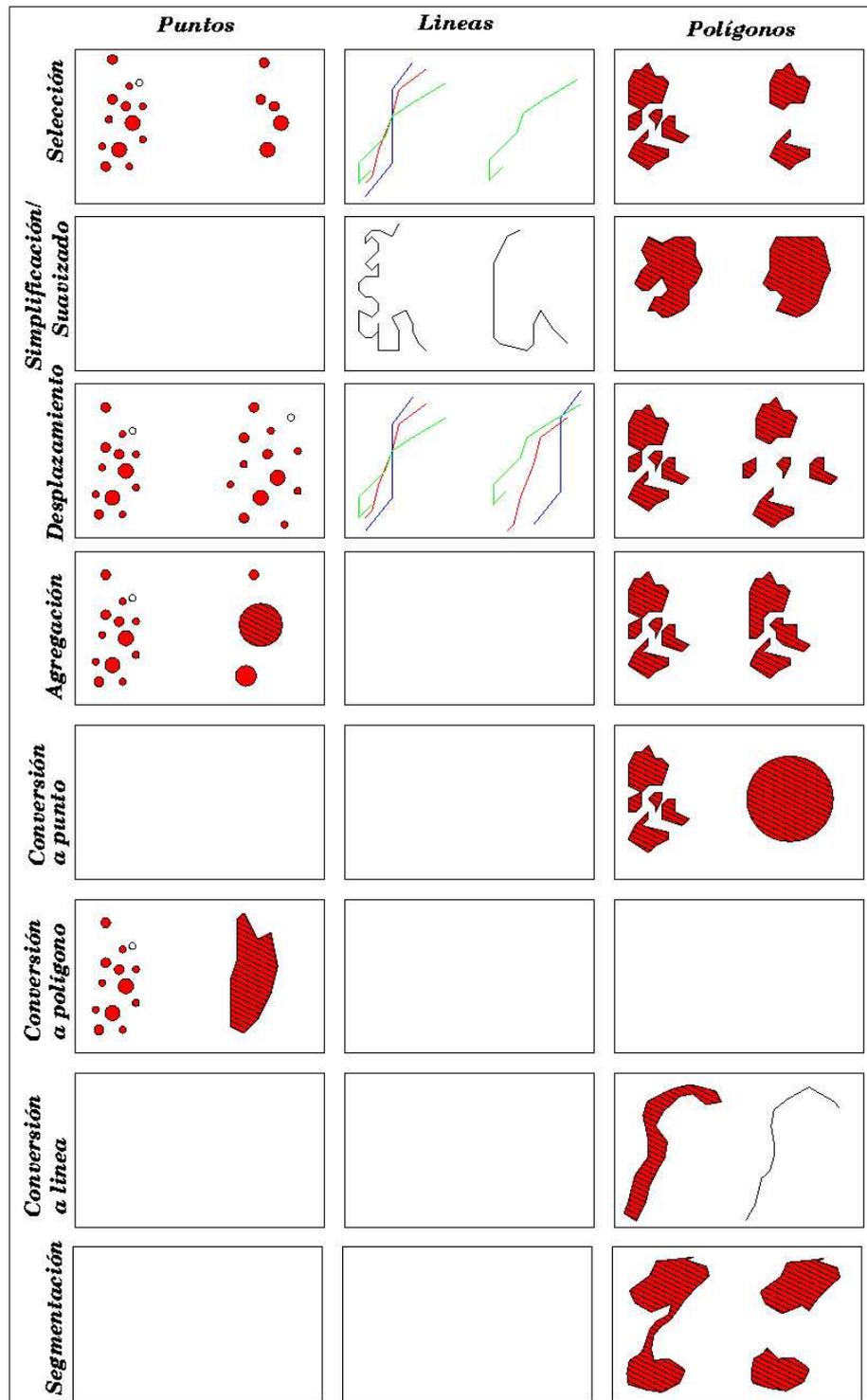


Figura 1.16: Ejemplos de las diferentes técnicas de generalización en cartografía

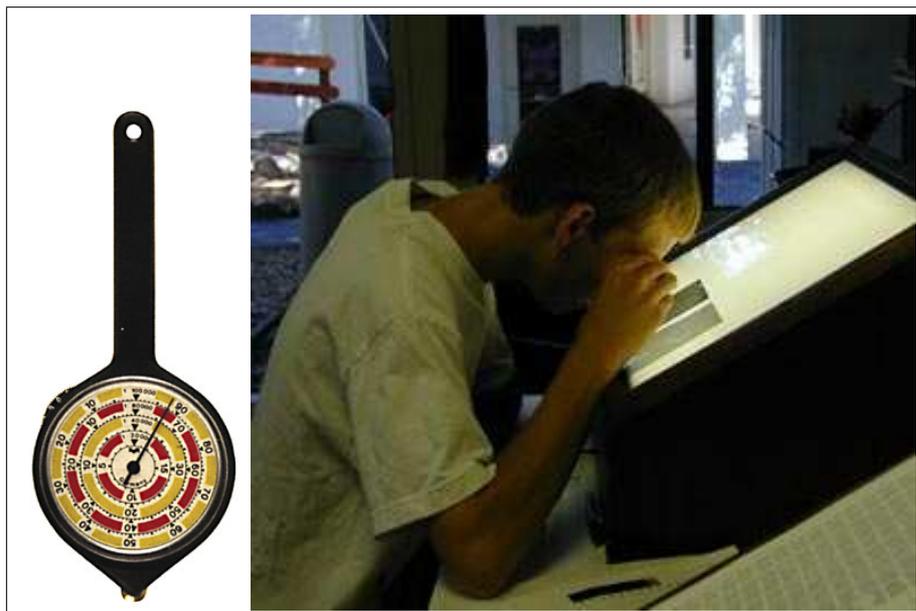


Figura 1.17: Técnicas de análisis de mapas

1.9. Bibliografía

- Alonso Fernández-Coppel, I. *Las coordenadas geográficas y la proyección UTM*
<http://www.cartesia.org/top.php> en la sección “30 archivos más descargados”
- Maling, D.H. (1991) “Coordinate systems and map projections for GIS” en Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (Eds.) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. John Wiley & sons pp. 135-146 (www.wiley.co.uk/wileychi/gis/resources.html)
- Robinson, A.H. (1987) *Elementos de Cartografía* Ediciones Omega, 544 pp.
- Van Sickle, J. (2004) *Basic GIS Coordinates* CRC Press 173 pags.
- <http://www.gva.es/icv/GLOSARIO.HTM>
- <http://www.uco.es/bb1rofra/documentos/proyecciones/proyecciones.html>
- http://www.uco.es/bb1rofra/documentos/utm/coordenadas_utm.html
- <http://www.lsgi.polyu.edu.hk/cyber-class/geodesy/>
- <http://nivel.euitto.upm.es/mab/tematica/htmls/proyecciones.html>
- <http://www.lsgi.polyu.edu.hk/cyber-class/geodesy/>

- <http://www.uco.es/bb1rofra/documentos/proyecciones>