

1. Nociones de Cartografía

1.1. Introducción

Como ya hemos visto en los capítulos anteriores, la proyección topográfica, que, como sabemos, supone plana una determinada porción de la superficie de la Tierra, es del todo insuficiente cuando se necesita representar un fragmento de la superficie terrestre de cierta extensión.

Es entonces cuando se recurre a los métodos propios de otra de las ciencias anexas a la Topografía. Se trata de la *Cartografía*.

El objetivo final de la Cartografía será, por tanto, representar en un plano una parte más o menos extensa, e incluso la totalidad, de la superficie terrestre.

Teniendo en cuenta que la superficie de la Tierra, ya la consideremos esférica o elipsoídica, no es desarrollable sin deformaciones ni rasgaduras, está claro que será necesario aplicar una cierta transformación para lograr este objetivo.

Así, la Cartografía estudia los *sistemas de proyección* más ade-

cuados para definir de forma biunívoca una correspondencia matemática entre los puntos del elipsoide y sus transformados en el plano. A estos métodos se les llama *Proyecciones Cartográficas*.

Esta transformación va a llevar consigo una serie de deformaciones, denominadas *anamorfosis*, que pueden ser *lineales*, *superficiales* o *angulares*.

Por tanto, además del elipsoide de referencia (sobre el que se proyectaban los puntos del terreno y se calculaban sus coordenadas geodésicas), para poder representar esos puntos sobre un plano necesitamos otra superficie de referencia desarrollable sobre la que, a su vez, se proyectarán los puntos del elipsoide, siguiendo una determinada relación matemática, la cual vendrá definida por el sistema de proyección cartográfica elegido.

Para clarificar un poco más este complejo proceso, podemos hacer un esquema como el que se muestra en la Fig. 1.

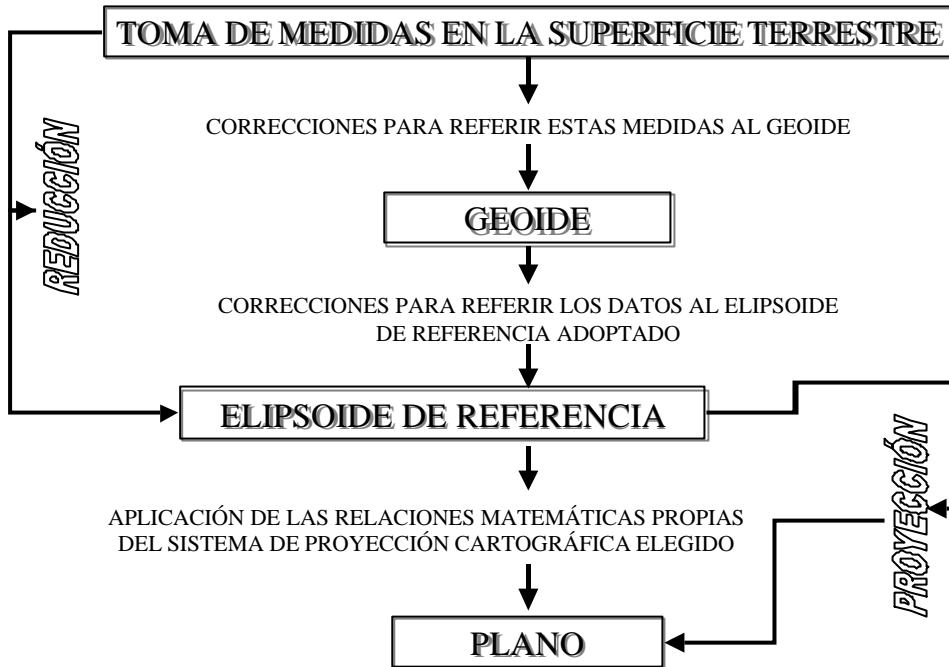


Fig. 1: Proceso necesario para llegar a la representación plana de una porción de la superficie terrestre

1.2. Clasificación de las proyecciones cartográficas

El profesor Peter H. Dana, de la Universidad de Texas, en Austin, cuenta en su página Web con una completa lista de las principales proyecciones cartográficas que pasamos a incluir a continuación, eso sí, traducida a la lengua castellana. Asimismo, se realiza una breve descripción de las proyecciones que se han considerado más relevantes.

1.2.1. Proyecciones cilíndricas

Una proyección cilíndrica se concibe, en su caso más simple, como un cilindro que coloca tangente a la Tierra por el Ecuador. Si se proyectan los puntos del Globo sobre el cilindro, y posteriormente desarrollamos éste, obtenemos un plano. Según la colocación del cilindro, podemos tener diversas variantes de la proyección:

1.2.1.1. Proyecciones cilíndricas regulares

El cilindro es tangente o secante en el Ecuador. Los paralelos y meridianos son líneas perpendiculares entre sí. La escala en el Ecuador es real. La mayor ventaja es que se trata de proyecciones de sencilla construcción que, además, pueden adaptarse para ser equidistantes (se conservan las distancias), equiáreas (se conservan las superficies) o conformes (se mantienen los ángulos tras la transformación).

Dentro de las proyecciones cilíndricas regulares podemos citar las siguientes:

- **Equirectangular:** se trata del más antiguo sistema de proyección, inventado sobre el año 100 a.C. Fue popular durante el Renacimiento, aunque declinó su utilización en el siglo XVIII.

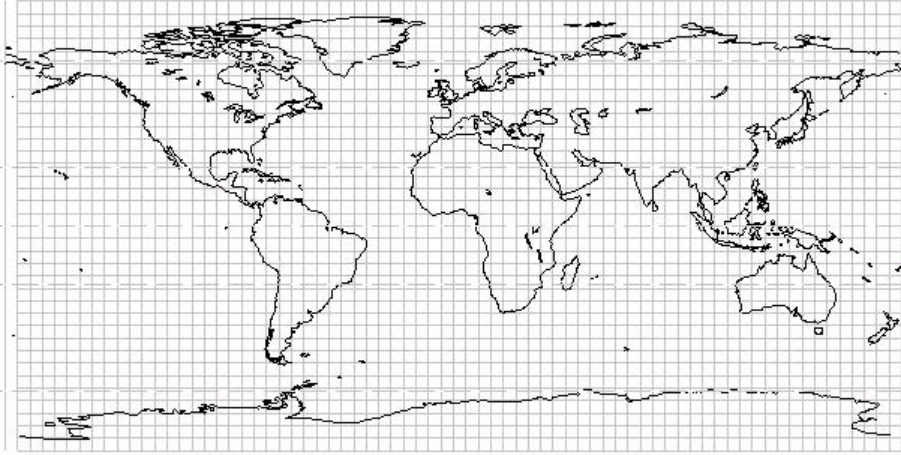


Fig. 2: Proyección cilíndrica equirectangular

- **Proyección de Mercator:** es una proyección conforme (se conservan los ángulos después de la transformación). Fue ideada en el año 1569 por Gerardus Mercator y se convirtió en la única utilizada para las cartas marítimas durante los siglos XVII y XVIII. Esto último tiene explicación: Mercator dotó a su proyección de la propiedad consistente en que el trazado de líneas de igual rumbo (loxodrómicas) en el plano, fuera una línea recta. Consiguió esto alterando la separación entre paralelos. Las ventajas de su empleo en navegación eran evidentes. Ha sido también profusamente empleada durante el siglo XX. Introduce deformaciones progresivamente crecientes con la latitud, razón por la cual se considera inutilizable a par-

tir de los 70° de latitud Norte o Sur.

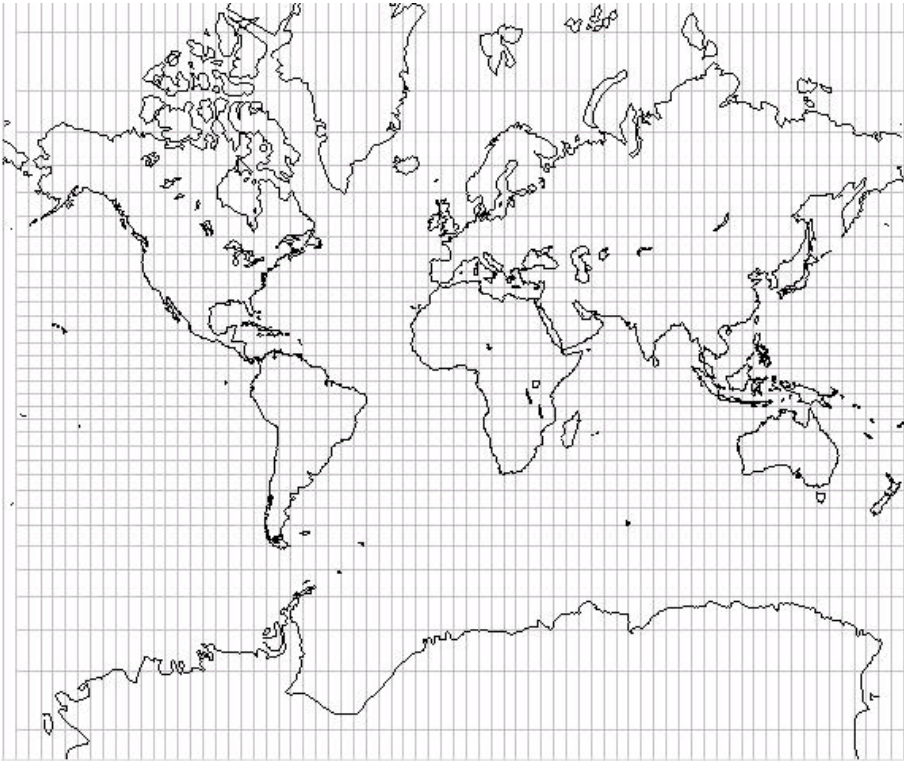


Fig. 3: Proyección de Mercator



Fig. 4: Retrato de Gerard Mercator



Fig. 5: Mapamundi de Mercator, 1587

- **Proyección cilíndrica equiárea de Lambert:** Fue introducida por Lambert en el año 1772. Tiene la propiedad de conservar las áreas del terreno. Los meridianos están regularmente espaciados, mientras que los paralelos se van juntando a medida que aumenta la latitud.

Otras proyecciones cilíndricas pueden ser la Proyección cilíndrica estereográfica de Gall o la cilíndrica de Miller

1.2.1.2. Proyecciones cilíndricas transversas

Son aquellas en las que la colocación del cilindro tangente a la Tierra ha sido girada 90° , de manera que en lugar de colocarse tangente al Ecuador, lo hace respecto al meridiano central.

Citaremos las siguientes:

- **Proyección transversa de Mercator:** Fue introducida por Lambert en el año 1772, y ha sufrido diversas modificaciones por Gauss (1822, dando origen a la actual UTM) y Kruger (1912). Esta proyección constituye la base para el sistema UTM (Universal Transverse Mercator).
- **Proyección de Cassini:** consiste en una proyección equirectangular con el cilindro colocado transversalmente. Fue inventada por Giovanni Cassini y se utilizó en Francia para mapas topográficos hasta 1803. En 1810 fue modificada por Soldner y se utilizó en Alemania y el Reino Unido. Durante el siglo XX ha dejado de utilizarse.

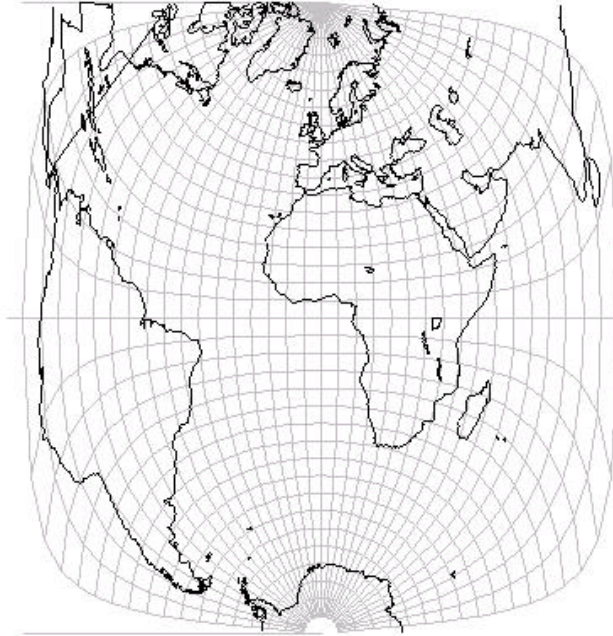


Fig. 6: Proyección de Cassini

1.2.1.3. Proyecciones cilíndricas oblicuas

En ellas la colocación del cilindro ha sido rotada 45° con respecto a la posición original (tangente al Ecuador). Dentro de estas proyecciones citaremos:

- **Proyección oblicua de Mercator:** introducida por Charles Peirce en 1894, ha sido utilizada en Asia y América Central (Atlas de Debes).

1.2.1.4. Proyecciones pseudocilíndricas

Entre ellas podemos citar la de Mollweide, la de Robinson, las proyecciones de Eckert y la proyección sinusoidal.

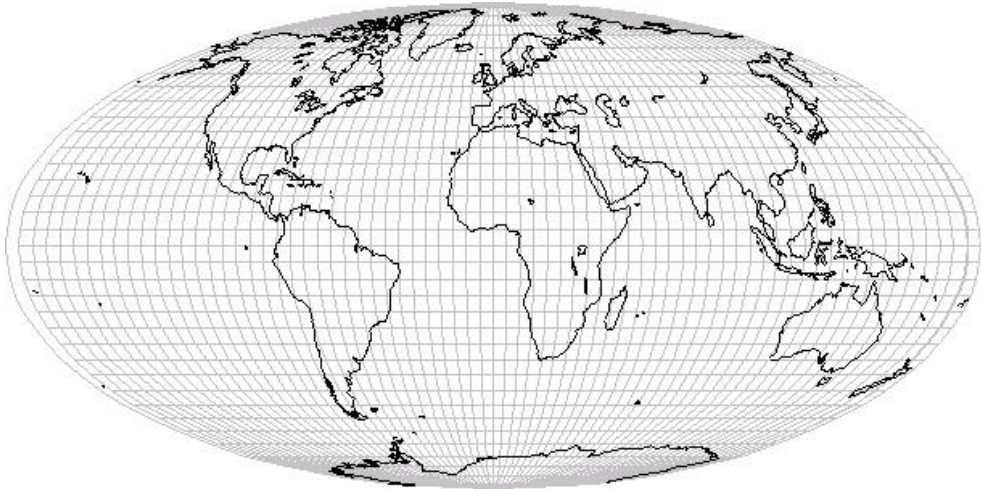


Fig. 7: Proyección pseudocilíndrica de Mollweide

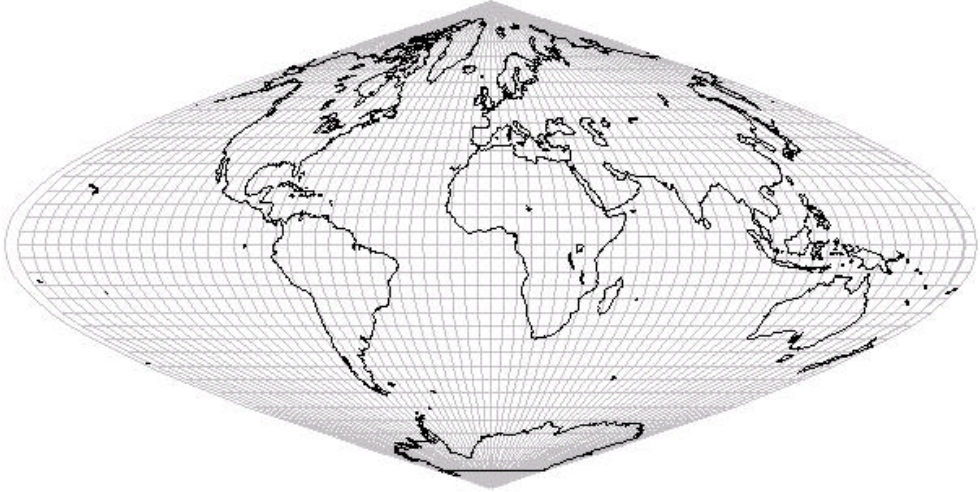


Fig. 8: Proyección sinusoidal

1.2.2. Proyecciones cónicas

La proyección se efectúa sobre un cono tangente (o secante) a la Tierra a lo largo de un paralelo que suele estar situado a una latitud media (es una circunferencia de menor diámetro que el Ecuador). El aspecto directo es aquel en el coincide el eje del cono con el eje de rotación terrestre. Los planos meridianos cortarían al cono según sus generatrices, que se convierten en las imágenes de los meridianos en la proyección. Los paralelos son secciones normales del cono, con radio variable en función de la latitud. Tras desarrollar el cono (Mario Ruiz Morales, Manual de Geodesia y Topografía) se obtiene la representación, formada por un conjunto de rectas convergentes (las imágenes de los meridianos) y por una serie de circunferencias concéntricas, con radio dependiente de la latitud.

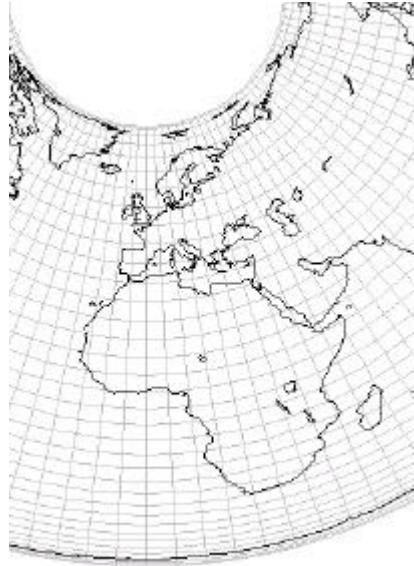


Fig. 9: Proyección cónica equiárea de Albers

Las proyecciones cónicas no son excesivamente utilizadas debido a que la zona de precisión que abarcan es relativamente pequeña¹, razón por la que normalmente se coloca el cono secante a lo largo de dos paralelos. Aún así, las distorsiones rápidamente se acentúan. Este tipo de proyecciones son más adecuadas, por tanto, para mapas que representen zonas o países en los que predomine la dimensión horizontal Este-Oeste sobre la dimensión vertical Norte-Sur. Este puede ser el caso de E.E.U.U., que frecuentemente pueden verse representados en este tipo de proyecciones.

¹ *Flattening the Earth: Two Thousand Years of Map Projections*, by John Snyder. University of Chicago Press. 1993.

Dentro de las proyecciones cónicas, mencionaremos las siguientes:

- **Proyección cónica simple o equidistante** (conserva las distancias)
- **Proyección cónica conforme de Lambert** (conserva los ángulos)
- **Proyección cónica equiárea de Albers** (Fig. 9)
- **Proyección cónica equiárea de Lambert**
- **Proyección policónica**

1.2.3. Proyecciones acimutales o planares

En este caso, se coloca un plano tangente al Globo. Si se hace incidir una fuente de luz en el interior del Globo sobre la retícula de meridianos y paralelos, ésta será proyectada sobre el plano dando lugar a alguno de los tipos de proyecciones acimutales, en función de dónde esté situada la fuente de luz².

Hablaremos de las siguientes proyecciones planares:

² John P. Snyder and Philip M. Voxland. **An Album of Map Projections** U.S. Geological Survey Professional Paper 1453. U.S. Government Printing Office: 1989.

- **Proyección gnomónica:** el haz luminoso está situado en el interior del Globo.
- **Proyección estereográfica:** el haz luminosa está situado en las antípodas del punto considerado, es decir, diametralmente opuesto.
- **Proyección ortográfica:** cuando la fuente luminosa está situada en el infinito y los haces de luz son paralelos entre sí.

1.3. Anamorfosis

Como ya decíamos al principio de este capítulo, toda proyección cartográfica, cualquiera que sea la elegida, conllevará una deformación en la superficie representada. Podemos distinguir las siguientes deformaciones:

- **Anamorfosis lineal:** sea L una longitud medida en el terreno y L' su homóloga en la proyección. El *módulo de deformación lineal* o *anamorfosis lineal* será:

$$m = \frac{L}{L'}$$

- **Anamorfosis superficial:** de igual modo, se designa por *anamorfosis superficial* la expresión:

$$s = \frac{S}{S'}$$

- **Anamorfosis angular:** un ángulo del terreno (α) tendrá su homólogo en la proyección (α'), de forma que el *módulo de deformación angular*, o *anamorfosis angular* será la diferencia de ambos ángulos ($\alpha - \alpha'$).

1.4. Clasificación de las proyecciones por el sistema de transformación

La clasificación ha pretendido englobar algunas de las proyecciones cartográficas más importantes. En este momento, vamos a clasificar todas las proyecciones existentes según el criterio de transformación empleado.

Así, tenemos³:

- **Sistemas convencionales:** No se trata de verdaderas proyecciones cartográficas. Por ejemplo, podemos citar el sistema policéntrico o poliédrico, utilizado en el Mapa Nacional de España, que describimos posteriormente.
- **Sistemas naturales o perpectivas:** se toma un centro único de proyección y se realiza ésta sobre un plano. Son verdaderas proyecciones, como es el caso de la estereográfica, gnomóni-

³ Domínguez García-Tejero, F.: *Topografía General y Aplicada*, Madrid, 1991,

ca u ortográfica, que antes denominábamos proyecciones planares o acimutales.

- **Sistemas artificiales o por desarrollo:** son aquellos basados en la sustitución de la superficie terrestre por otra desarrollable, como la de un cono o un cilindro. Ejemplos de estas podemos encontrarlos en las páginas anteriores. Sobre el cono o cilindro, se trasladan los puntos de la superficie terrestre, siguiendo una determinada ley matemática de transformación. Posteriormente se efectúa el desarrollo de la superficie escogida (cono o cilindro), dando origen a la proyección.

A continuación estudiaremos con más detalle las proyecciones más importantes.

1.5. La proyección policéntrica

Es la utilizada en las primeras ediciones del **Mapa Topográfico Nacional** (MTN) a escala 1:50.000. Considera el territorio nacional dividido en trapecios curvilíneos de 20' de longitud y 10' de latitud, que totalizan las 1.130 hojas (incluidas las correspondientes a Baleares y Canarias).

Para la proyección se supone trazado en el centro de cada trapecio curvilíneo el plano tangente al elipsoide. De esta manera queda sustituida la superficie del elipsoide por una superficie poliédrica circunscrita. Se toman tantos centros de proyección como hojas, por lo que se

denomina “policéntrico”.

Las desgarraduras que se producen en esa superficie poliédrica son despreciables a escala 1:50.000.

1.6. La Proyección UTM (o “cilíndrica transversa conforme⁴ de Gauss”)

Este sistema de proyección cartográfica está hoy muy extendido con carácter universal. Fue llamada **U.T.M.**, de “*Universal Transverse Mercator*”, ya que por ser cilíndrica es parecida a la de Mercator⁵, pero el cilindro se coloca transversalmente, es decir, con el eje sobre el ecuador.

Se toma como superficie desarrollable un cilindro (es una proyección cilíndrica) que se coloca tangente al elipsoide de referencia, de

⁴ **Proyecciones conformes:** son aquellas que conservan los ángulos del terreno, es decir, no presentan anamorfosis angular.

⁵ **Mercator, Gerard:** (Rupelmonde, 1512-Duisburg, 1594). Matemático y geógrafo flamenco, cuyo verdadero nombre era Gerhard Kremer. Discípulo de Frisius en Lovaina, trazó diversos mapas, entre los que sobresalen dos globos (uno terráqueo y otro celeste) por encargo de Carlos V, ambos de 1541 y, sobre todo, el primer mapamundi para uso de navegantes (1569, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, pág **¡Error! Marcador no definido.**), para cuya elaboración utilizó un sistema de representación plana de la Tierra llamado «**proyección de Mercator**», en el que la superficie de proyección corresponde a la de un cilindro tangente al ecuador esférico. Más tarde trabajó en un gran Atlas (1595), que serviría de base para los posteriores trabajos de Jedocus Hondius.

manera que el eje del cilindro está dentro del plano del ecuador, es decir, que el cilindro es tangente al elipsoide a lo largo de una línea que define un meridiano tomado como origen (véase Fig. 10).

Se proyectan los puntos del elipsoide sobre el cilindro según una determinada relación matemática. Luego se desarrolla el cilindro para obtener el plano, de forma que el eje Y queda determinado por la línea del meridiano de origen (que es la única línea automecoica⁶ de la proyección) y el eje X es la generatriz tangente al ecuador del cilindro.

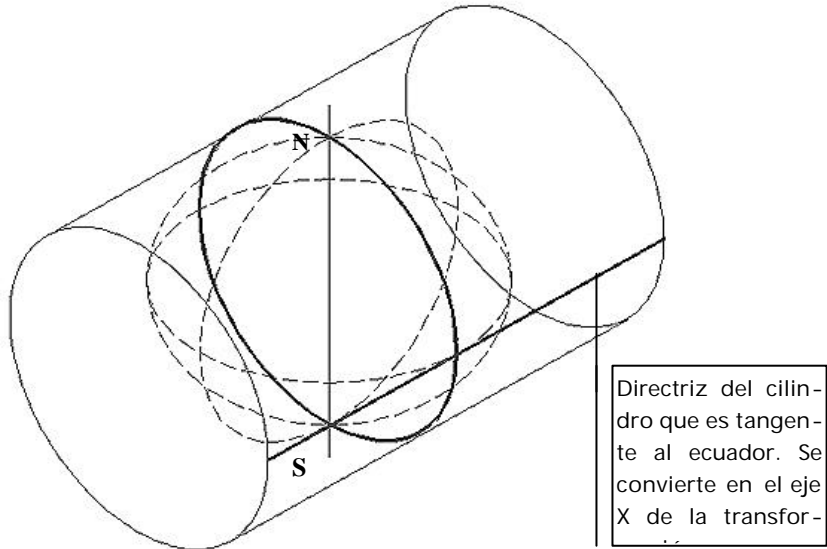


Fig. 10: Proyección UTM. Cilindro tangente a la Tierra.

Las **coordenadas UTM** de un punto sobre el plano se determinarán, mediante relaciones matemáticas, a partir de las coordenadas geográficas determinadas sobre el elipsoide. Por tanto las coordenadas

⁶**Línea automecoica:** línea en la que se conservan las distancias sin sufrir deformación (anamorfosis lineal) en una determinada proyección cartográfica.

UTM son coordenadas cartesianas correspondientes al plano que resulta al hacer la transformación de los puntos del elipsoide sobre una superficie desarrollable elegida que es el cilindro.

Puede establecerse así una correspondencia biunívoca entre las coordenadas geográficas (longitud y latitud) referidas al elipsoide y las coordenadas UTM (x,y) (cartesianas) referidas al plano transformado.

Para la elaboración del **sistema de proyección UTM** se han adoptado las siguientes premisas⁷:

- Elección de un elipsoide de referencia: En 1930 la Asociación Internacional de Geodesia recomendó la utilización del Elipsoide Internacional de **Hayford**, aunque el sistema UTM es válido para cualquier otro elipsoide sin más que cambiar sus parámetros (semieje mayor y aplanamiento, ya vistos).
- Elección de un punto astronómico fundamental o “**datum**”. España se encuentra en el datum correspondiente a Europa occidental, en las proximidades de Postdam (Alemania), de ahí la identificación de “**datum postdam**” que aparece en muchos mapas.
- Elección de un **sistema de representación plano conforme** (que conserva los ángulos, como el de Gauss). Este sistema presenta el inconveniente de que no puede aplicarse a grandes extensiones, pues se alcanzan unas deformaciones intolerables. Para

⁷ López-Cuervo y Estévez, S.: Topografía, Madrid, 1993, pág. 377.

subsano el problema, se subdivide el Globo en 60 husos iguales de 6° de longitud (Tabla 1), paralelos a los meridianos. Este sistema, por la misma razón, tampoco es aplicable a altas latitudes, por lo cual se limitan éstas a 80° de latitud Norte y Sur. De aquí hacia arriba (hacia los polos) se encarga el **sistema UPS** (Universal Polar Stereographic)⁸, utilizándose la proyección estereográfica.

Con este sistema España queda incluida dentro de los husos **28, 29, 30 y 31**; incluidas Baleares y Canarias.

⁸ **UPS**: La red UPS (Universal Polar Estereográfica) complementa la UTM en las latitudes polares. Los sistemas UTM y UPS fueron utilizados en un principio por el ejército estadounidense, pero en la actualidad son de amplia y creciente aplicación en todo el mundo.

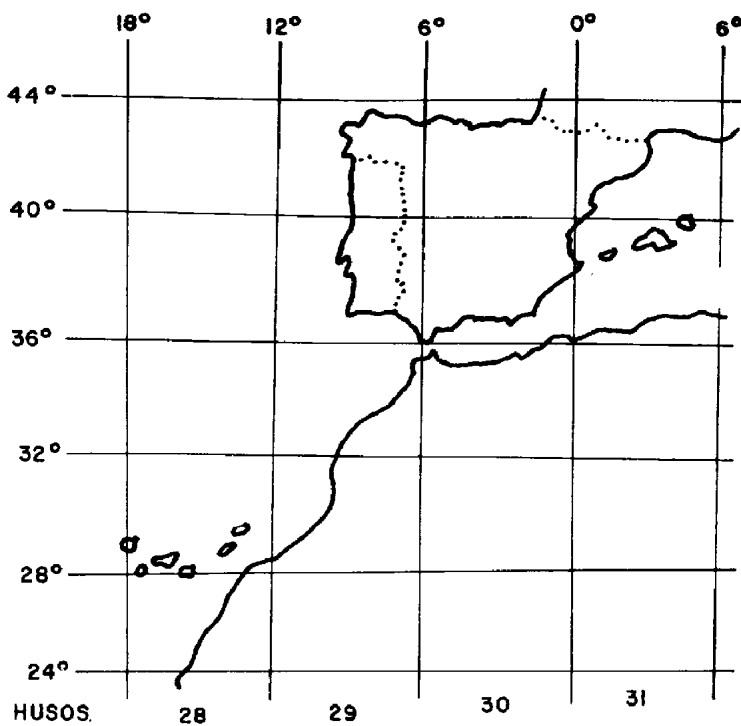


Fig. 11: Husos cuadrícula UTM.

Tabla 1: Detalle de los husos UTM

Huso UTM	Meridiano Central del huso	Rango de longitudes del huso
01	177° W	180° W-174° W
02	171° W	174° W-168° W
03	165° W	168° W-162° W
04	159° W	162° W-156° W
05	153° W	156° W-150° W
06	147° W	150° W-144° W
07	141° W	144° W-138° W
08	135° W	138° W-132° W
09	129° W	132° W-126° W
10	123° W	126° W-120° W
11	117° W	120° W-114° W
12	111° W	114° W-108° W
13	105° W	108° W-102° W
14	099° W	102° W-096° W
15	093° W	096° W-090° W
16	087° W	090° W-084° W
17	081° W	084° W-078° W
18	075° W	078° W-072° W

19	069° W	072° W-066° W
20	063° W	066° W-060° W
21	057° W	060° W-054° W
22	051° W	054° W-048° W
23	045° W	048° W-042° W
24	039° W	042° W-036° W
25	033° W	036° W-030° W
26	027° W	030° W-024° W
27	021° W	024° W-018° W
28	015° W	018° W-012° W
29	009° W	012° W-006° W
30	003° W	006° W-000E
31	003° E	000° E-006° E
32	009° E	006° E-012° E
33	015° E	012° E-018° E
34	021° E	018° E-024° E
35	027° E	024° E-030° E
36	033° E	030° E-036° E
37	039° E	036° E-042° E
38	045° E	042° E-048° E
39	051° E	048° E-054° E

40	057° E	054° E-060° E
41	063° E	060° E-066° E
42	069° E	066° E-072° E
43	075° E	072° E-078° E
44	081° E	078° E-084° E
45	087° E	084° E-090° E
46	093° E	090° E-096° E
47	099° E	096° E-102° E
48	105° E	102° E-108° E
49	111° E	108° E-114° E
50	117° E	114° E-120° E
51	123° E	120° E-126° E
52	129° E	126° E-132° E
53	135° E	132° E-138° E
54	141° E	138° E-144° E
55	147° E	144° E-150° E
56	153° E	150° E-156° E
57	159° E	156° E-162° E
58	165° E	162° E-168° E
59	171° E	168° E-174° E
60	177° E	174° E-180° W

En cada Huso se define la proyección de los puntos del elipsoide (que a su vez corresponden a la proyección sobre éste de los puntos del terreno) de forma individual.

Como se ha visto, los husos quedan limitados por dos meridianos separados 6° entre sí. Para minimizar las deformaciones al proyectar los puntos del elipsoide se coloca el cilindro secante al mismo, en lugar de ser tangente a lo largo de un meridiano central. Las dos líneas de tangencia serán líneas automecoicas en la transformación.

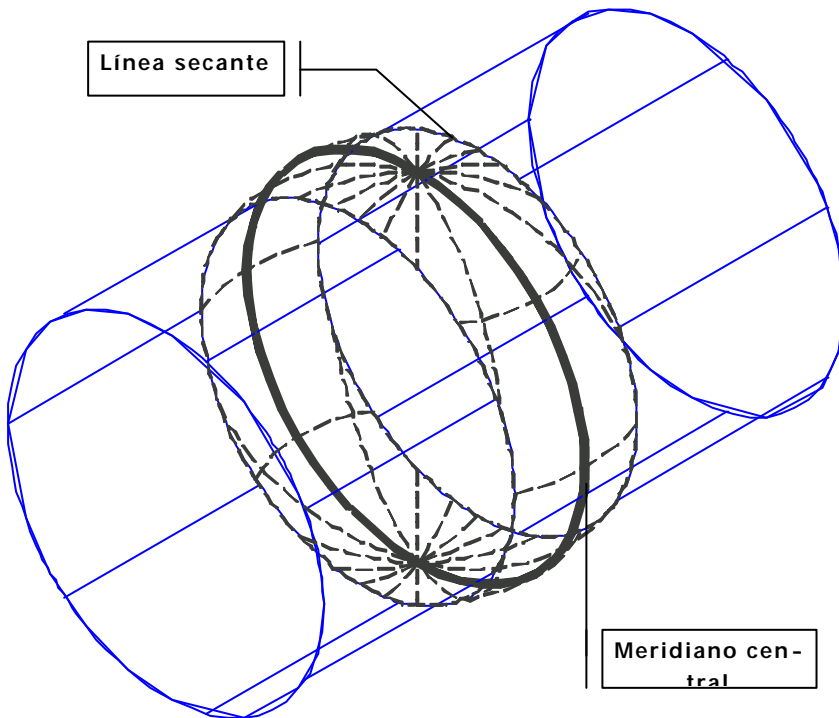


Fig. 12: Proyección UTM. Cilindro secante a la Tierra.

- El **origen de longitudes** se toma el correspondiente al meridiano central de cada huso. Como valor de la abscisa (X) en dicho meridiano se toma $X=500.000$ metros, con el fin de evitar valores negativos en las coordenadas.
- El **origen de latitudes** se toma referido al Ecuador. Para el hemisferio norte, el valor de la ordenada referida al Ecuador es $Y=0$ m.; para el hemisferio sur, se toma el valor de la ordenada en el Ecuador $Y=10.000.000$ m., a fin de evitar valores negativos.

Todas las unidades se expresan en metros.

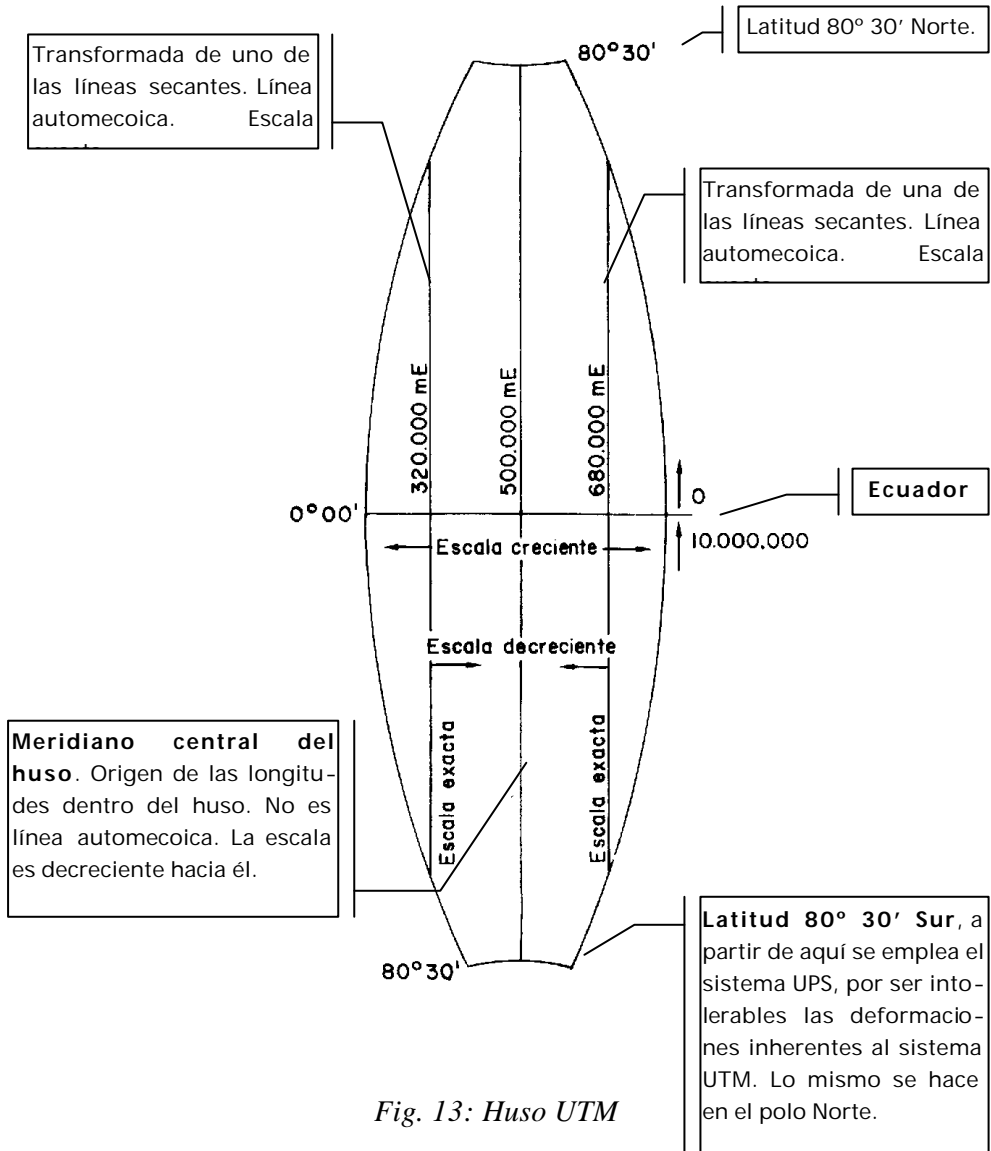


Fig. 13: Huso UTM

1.7. La cuadrícula definida en la proyección U.T.M.

Ya se ha visto que en la proyección UTM se considera la superficie de la Tierra definida por husos de 6° en longitud (sentido horizontal), que se numeran del 1 al 60, partiendo del antimeridiano de Greenwich y contados en sentido Oeste-Este.

A su vez, estos husos se dividen en “zonas” de 8° de amplitud en latitud (sentido vertical), desde los $80^\circ 30'$ de latitud Norte hasta los $80^\circ 30'$ de latitud Sur, que es la amplitud total en longitudes para la que se consideran tolerables las deformaciones o anamorfosis inherentes a la proyección UTM. Estas zonas se identifican por letras mayúsculas desde la C hasta la X, excluidas la I, LL, Ñ y O (ver Fig. 14)

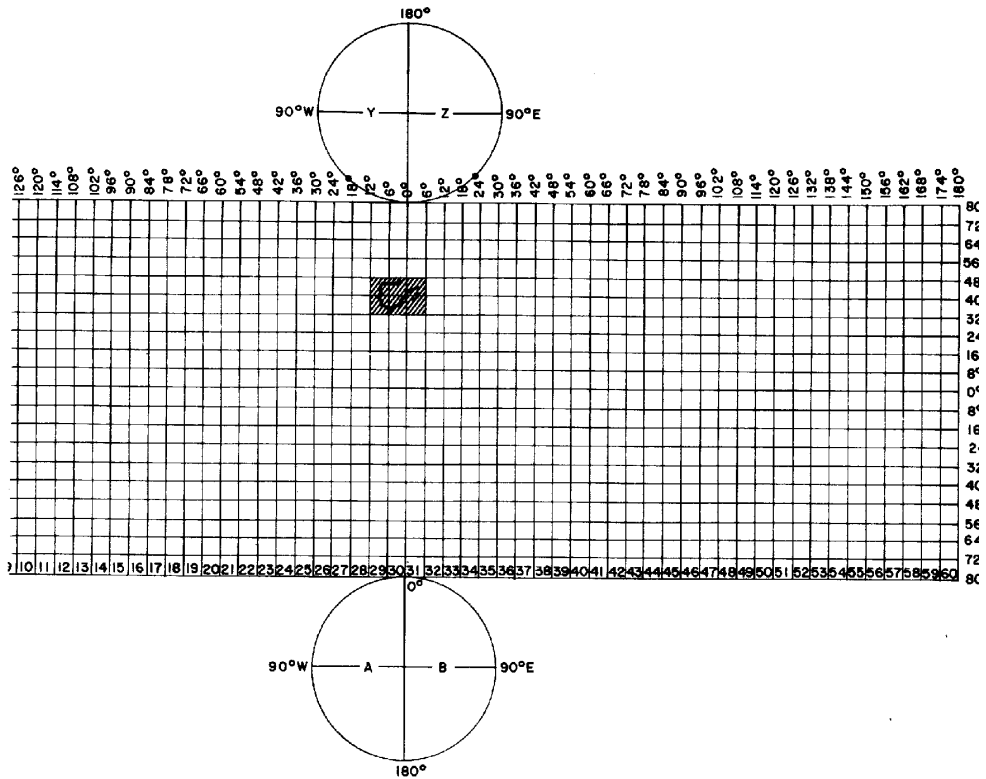


Fig. 14: Cuadrícula UTM. Husos y zonas

Una zona queda identificada con el número del huso y con la letra correspondiente. Por ejemplo, en la figura, Cataluña quedaría incluida dentro de la zona **30T**.

A su vez, esta red cuadrículada primaria, se subdivide en cuadrados de 100 Km. de lado. Estos nuevos cuadrados se designan también con letras mayúsculas y se identifican, de izquierda a derecha y de abajo arriba, con la letra de la columna y la letra de la fila (ver Fig. 15).

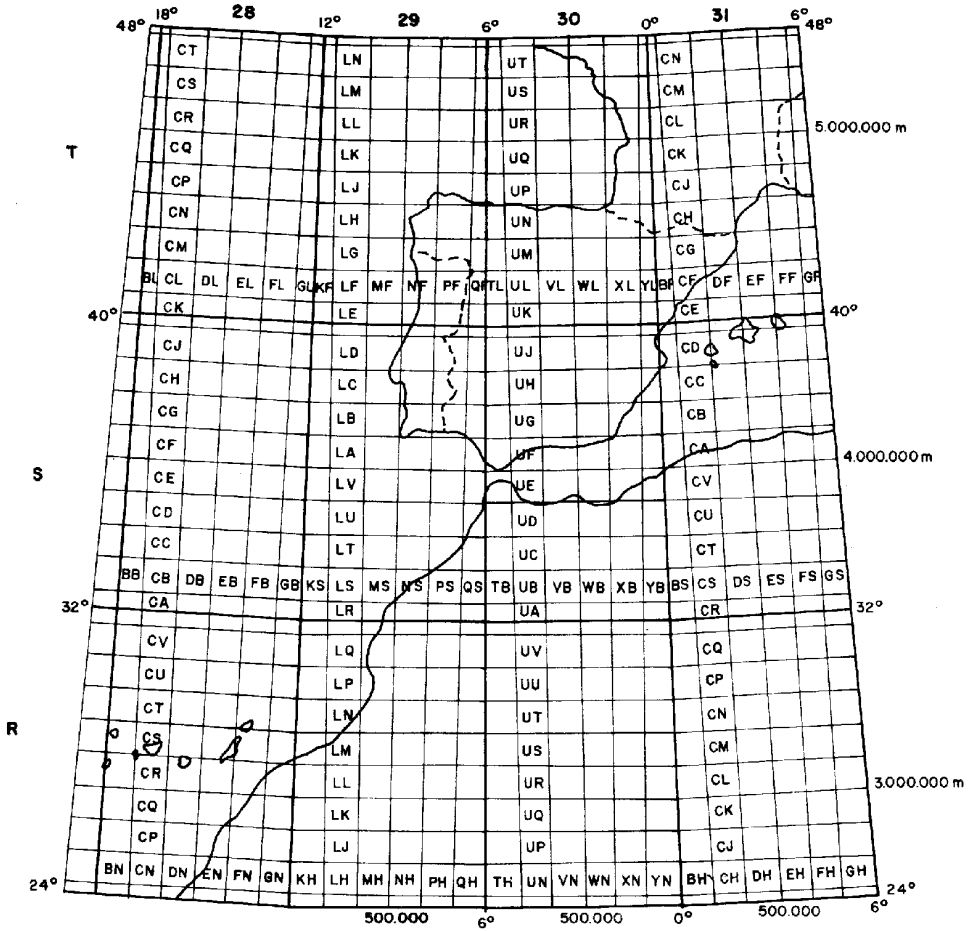


Fig. 15: Detalle de la cuadrícula UTM.

Las columnas de estos cuadrados de 100 Km. de lado se codifican partiendo del meridiano 180° en sentido Este y a lo largo del Ecuador. Se repiten las letras identificativas cada 18° en longitud. Se comienza en la A y finaliza en la Z, excluidas la I, LL, Ñ y O.

Las filas comienzan en el Ecuador en los husos impares y en los pares en la línea de la cuadrícula que se encuentra 500.000 metros al sur del Ecuador.

Los cuadrados de 100 Km. se subdividen de nuevo en cuadrados de 10 Km. para escalas inferiores a 1:100.000 o cuadrados de 1 Km. en escalas superiores a 1:100.000, que es el caso de la cuadrícula que podemos ver en el Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 ó 1:25.000.

Mediante esta codificación, podemos definir las coordenadas de cualquier punto de la superficie terrestre con la precisión deseada. Por ejemplo, para un punto perteneciente al huso 29 con las coordenadas rectangulares UTM siguientes:

$$X=652.000,45 \quad Y=4.350.000,52$$

Tendríamos los siguientes datos (Fig. 15):

- Identificación de la zona: **29T**
- Identificación del cuadrado de 100 Km.: **PD**

Las coordenadas numéricas del punto (expresadas con 1 cm de precisión), se indican tal y como las hemos visto antes pero quitando la primera cifra a las abscisas y las dos primeras cifras a las ordenadas, es decir, excluyendo los millares y centenas de kilómetros, y sin poner las comas decimales, así:

$$X = 652.000,45 \quad \rightarrow \quad 5200045$$

$$Y = 4.350.000,52 \rightarrow 5000052$$

De modo que este punto quedaría identificado de la siguiente forma:

29T PD 5200045 5000052

Hemos visto, pues, que el sistema de proyección UTM nos permite establecer un sistema plano de coordenadas cartesianas en la práctica totalidad de la superficie terrestre (excluidas las altas latitudes), con lo que podemos localizar en un mapa cualquier punto del globo con la precisión deseada.

No debe olvidarse que el centro de cada huso tiene coordenada 500.000 metros en abcisa, por lo cual, debe indicarse el huso al cual se están refiriendo las coordenadas del punto. Por ejemplo, la península ibérica está comprendida dentro de los husos 29, 30 y 31 y el centro de cada uno de ellos representará las coordenadas 500.000 metros en X, con lo cual debería indicarse para evitar equivocaciones.

Normalmente, cuando se está ejecutando un determinado proyecto, éste suele estar englobado dentro de un mismo huso UTM, con lo cual no hay problemas y suele obviarse, aunque siempre es mejor indicarlo.

1.8. Estado actual del sistema de proyección U.T.M.

En el año 1970 se adopta como reglamentaria la proyección

U.T.M. (Decreto 2303/1970 de 16 de Julio) para la corrección, revisión y nueva confección del Mapa Topográfico Nacional y para el resto de información cartográfica publicada por el entonces Instituto Geográfico Catastral, hoy denominado Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Desde entonces, la gran mayoría de trabajos cartográficos realizados por las distintas Administraciones (Central, Autonómicas y Locales) han sido confeccionados en proyección UTM. Por lo tanto, la utilización de este sistema es generalizada, de ahí la importancia de su comprensión para el ingeniero.

La nueva construcción y cálculo de la Red Geodésica Nacional (ver capítulo relativo a Geodesia) que ha llevado a cabo el I.G.N. ofrece una cobertura casi total del territorio nacional. Así, puede disponerse de una serie de vértices geodésicos, correspondientes a las diferentes triangulaciones de primer, segundo y tercer orden, perfectamente materializados en el terreno de los cuales son conocidas las coordenadas geográficas (longitud y latitud) y las UTM. La retícula triangular que cubre el territorio peninsular tiene un lado medio de unos 7 Km., con lo cual, el trabajo cartográfico de cualquier proyecto de ingeniería puede ser perfectamente referido a la Red Geodésica Nacional y, por tanto, trabajar en coordenadas rectangulares UTM.

A priori, una de las mayores ventajas de este sistema es que todos los trabajos a él referidos, pueden interconectarse entre sí, pues están calculados y diseñados en el mismo idioma.

1.9. Esquema del trabajo cartográfico

La consecución de un mapa o plano que represente con fidelidad la porción de la superficie de la Tierra que se va a estudiar no es una tarea sencilla y pasa por una serie de fases claramente diferenciadas (Fig. 1):

- Toma de medidas en la superficie terrestre.
- Corrección de las medidas anteriores y traslado de las mismas al Geoide.
- Traslación de las medidas del Geoide al Elipsoide de revolución.
- Definición de la correspondencia entre las medidas del Elipsoide y sus homólogas en el plano.
- Confección del plano

No debe olvidarse que las medidas (angulares y de distancias), se realizan sobre la superficie terrestre, y para su utilización correcta hay que pasarlas al Elipsoide de referencia y luego de éste al plano mediante la proyección cartográfica elegida (en nuestro caso la U.T.M.).

Este proceso se divide en dos fases:

- **Reducción:** con la reducción se pasan las medidas tomadas en el campo al elipsoide de revolución tomado como Elipsoide de referencia, sobre el que se ha calculado la Red Geodésica Nacional.
- **Proyección:** se establece la correspondencia entre las magnitudes del elipsoide y sus homólogas en el plano. En este caso particular se utilizará la correspondencia que establece la proyección U.T.M.

Todo el trabajo ha de desarrollarse teniendo en cuenta las características de **precisión** de los aparatos empleados, las **precisiones requeridas** y la **tolerancia**. Tendría poco sentido efectuar correcciones de milímetros en medidas que se han tomado con aparatos que sólo permiten precisiones de centímetros.

1.10. La escala de los mapas

Los mapas son, por necesidad, más pequeños que las áreas que representan, de manera que para poder ser utilizados deben indicar la razón entre magnitudes comparables. A esta razón se la denomina **escala del mapa** y es el primer dato que debe observarse al visualizar el mismo.

La escala de un mapa es difícil de obtener debido a que, en función de la transformaciones antes descritas para pasar de un elipsoide a un plano, la escala será variable de un lugar a otro del mapa. No es posible transformar la superficie elipsoídica en un plano sin que ésta se “**encoja**” o “**alargue**” en el proceso.

Esto significa que la escala indicada en el mapa, llamada **Escala Numérica**, únicamente será del todo válida en ciertos puntos o a lo largo de determinadas líneas (automecoicas), en los demás lugares, la escala será mayor o menor que la escala numérica.

Se denomina **Factor de escala** el cociente entre la Escala Numérica y el valor real de la escala.

En definitiva, cuando se realiza un determinado proyecto de ingeniería, primero se parte de mediciones sobre el terreno, posteriormente se realiza el diseño sobre una determinada cartografía plana obtenida a partir de las medidas en campo. Finalmente, hay que plasmar la obra proyectada en el terreno, es decir, pasar las medidas tomadas sobre la cartografía plana a la superficie terrestre.

Este es un proceso delicado y hay que tener muy claros todos los conceptos vistos hasta ahora:

Las distancias medidas previamente sobre el terreno sufren un doble proceso de transformación, primero sobre el elipsoide (reducción) y luego sobre el plano (proyección). Esto quiere decir que las medidas tomadas sobre el plano al hacer el diseño de un proyecto no se corresponden directamente con las que habrá que plasmar posteriormente en el campo al hacer el replanteo.

Por tanto, en la medida de las distancias podemos definir dos tipos de influencia:

- **Influencia de la reducción:** la medida tomada inicialmente

en campo, se transforma al hacer la reducción y pasarla al elipsoide.

- **Influencia de la proyección:** el paso de las medidas del elipsoide al plano también conlleva una deformación de las mismas. En el caso particular de la proyección UTM, es claro que a medida que un lugar se separa del meridiano de tangencia (ver Fig. 10, pág. 18), las deformaciones son cada vez mayores. Ya se ha visto que para paliar este efecto se ha dividido el globo en 60 husos de 6° en longitud y en zonas de 8° en latitud.

Aún así, es obvio que en cualquier plano definido en proyección UTM, la medida de distancias está influida por un determinado Factor de Escala (K) que depende de la situación dentro del mapa.

En la siguiente tabla puede verse un ejemplo de lo que puede suponer este doble efecto en la medida de distancias

Tabla 2: Influencia de la reducción y la proyección en la medida de distancias

Distancia geométrica	Distancia reducida (plano horizontal)	Distancia sobre el Elipsoide	Distancia en proyección UTM (en el plano)
5.000 m.	4.992,152 m.	4.991,248 m.	4.989,777 m.

Como puede observarse, estas cifras son lo suficientemente significativas como para que no puedan ser despreciadas a la hora de

definir correctamente cualquier proyecto de ingeniería y hay que tener en cuenta este doble efecto para, en el replanteo, llevar al terreno las verdaderas medidas que tomamos en el plano.

El empleo del sistema UTM conlleva una serie de ventajas e inconvenientes que es muy importante conocer de cara a su correcta utilización:

Ventajas:

- Al ser el UTM un sistema de proyección universal permite la interconexión de cualquier trabajo cartográfico sin ambigüedades.
- La práctica totalidad de los vértices geodésicos poseen coordenadas geográficas y sus correspondientes UTM. Esto, unido a la notable densidad de dichos vértices, hacen fácil basar en estos cualquier trabajo topográfico.
- Existe una gran cantidad de cartografía realizada en este sistema a nivel nacional.
- Permiten la integración de trabajos basados en cartografías a diferentes escalas. También permiten la conexión inequívoca de tramos comunes de proyectos diferentes, pues estamos hablando de coordenadas universales.

Inconvenientes:

- El principal inconveniente de este sistema son las deformacio-

nes introducidas por la proyección. Esto hace dificultoso su empleo a escalas pequeñas, ya que los errores que pueden acumularse en las medidas son mayores que la precisión exigida a esa escala.

Según lo visto hasta ahora puede darnos la impresión de que las coordenadas UTM sólo vienen a complicarnos la vida, pues su correcta interpretación y empleo no es una tarea tan sencilla.

A la escala de un proyecto de ingeniería de dimensiones moderadas este problema tiene sencilla solución. Puede establecerse un sistema local o particular de **coordenadas rectangulares planas**, basadas en las deducidas de una **poligonación conforme**⁹ siempre que se tengan una serie de precauciones:

- Las bases de replanteo no deben estar muy alejadas entre sí, aunque los modernos aparatos topográficos permitan hacer cálculos muy cómodamente desde una misma base. En general, no debe haber más de 500 metros de distancia entre una base y otra. Hay que tener en cuenta que el error originado por las deformaciones de la proyección UTM está alrededor de los 4 cm. por cada 100 metros.
- Debe verificarse que el error angular entre bases contiguas esté siempre por debajo de la tolerancia (para asegurar la con-

⁹ **Poligonación conforme**: es una poligonal en la que se mantienen los ángulos del terreno al pasar al plano. El método de poligonación, con posterior radiación, ha sido el descrito para efectuar levantamientos con estación total, en el capítulo dedicado a la

formidad de la poligonal definida por las bases), que será función de la precisión requerida, a su vez dependiente de la escala.

- Debe utilizarse cada base de replanteo solamente dentro de su zona de alcance, sin sobrepasar las medidas de más de 500 metros, que empiezan a introducir errores de cierta consideración.

Es de gran importancia que coincidan las coordenadas y las medidas obtenidas desde las bases de replanteo con las que se obtengan en el plano (en gabinete) para que este proceso de simplificación tenga validez.

De esta manera hemos conseguido hacer compatible un sistema **de coordenadas rectangulares planas** con origen en un vértice geodésico con el **sistema de coordenadas UTM**.

Tabla 3: Escalas cartográficas más frecuentes y sus equivalentes

Escala del mapa	Un centímetro equivale a:	Un kilómetro es representado por:
1:1.000	10 m	100 cm (1 m.)
1:2.000	20 m	50 cm
1:5.000	50 m	20 cm
1:10.000	100 m	10 cm
1:25.000	250 m	4 cm
1:50.000	500 m	2 cm
1:100.000	1000 m (1 Km)	1 cm
1:250.000	2500 m (2,5 Km)	4 mm
1:500.000	5000 m (5,0 Km)	2 mm
1:1.000.000	10000 m (10,0 Km)	1 mm

1.11. Representaciones del terreno. Globos, cartas, mapas, planos.

- **Globos**: representan sobre una esfera todos los mares y continentes, además del relieve. Sería el sistema más perfecto si no fuese por la dificultad de su manejo, que hace necesario disponer de representaciones planas, sobre un papel.
- **Mapa**: cualquier representación plana de una porción de la superficie terrestre que, por su extensión (debido a la curvatura de la Tierra), requiera el uso de sistemas propios de la Cartografía (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).
- **Carta**: es un mapa marino, en contraposición con los mapas terrestres.
- **Plano**: representación “plana” de una porción de la superficie terrestre que, por ser de pequeñas dimensiones, no requiere la utilización de sistemas cartográficos, pues la curvatura terrestre puede ser despreciada.