

TEMA 1. FUNDAMENTOS DE GEODESIA Y CARTOGRAFÍA.

1.1 PLANOS ACOTADOS Y PLANOS CON CURVAS DE NIVEL.

El sistema de planos acotados se utiliza para la representación en el plano de superficies topográficas (aquellas que envuelven la parte sólida de la Tierra). En este sistema cada punto de la superficie se representa por su proyección sobre un plano horizontal y por su altura o cota.

Para dar una idea clara del relieve se utilizan las curvas de nivel, que son líneas que unen en el plano los puntos de igual cota. En planos de terrenos de poca extensión puede prescindirse de la esfericidad terrestre. Las curvas de nivel vendrán dadas por la proyección sobre el plano de comparación, de las intersecciones de la superficie con planos paralelos. En los planos con curvas de nivel se señala sobre cada curva, la cota que corresponde al plano secante.

Los desniveles de curva a curva deben ser una cantidad constante, dándose el nombre de equidistancia de una superficie topográfica a la distancia vertical constante que separa dos secciones horizontales consecutivas.

La superficie topográfica no coincide exactamente con la superficie real del terreno y se aproximará más cuanto menor sea la equidistancia.

1.2. DISTANCIA NATURAL, GEOMÉTRICA, REDUCIDA Y DESNIVEL.

La **distancia geométrica** D_g es la distancia definida en el espacio por el segmento A-B. La **distancia reducida** D_r es la distancia entre los dos puntos en la proyección horizontal a-b. La relación entre ambas se expresa por el coseno del ángulo que forman, es decir, del **ángulo de pendiente**.

La **distancia natural** es el desarrollo de la sección del terreno por un plano vertical que pasa por A y por B.

La diferencia de las cotas de los extremos del segmento A y B se llama **desnivel**.

1.3. SISTEMA DE REPRESENTACIÓN USADO EN TOPOGRAFÍA.

El problema que es necesario resolver es representar en el papel, que sólo tiene dos dimensiones, el terreno con sus relieves que es de tres dimensiones, por lo que necesitamos alguno de los sistemas representativos que estudia la Geometría Descriptiva.

De los cuatro sistemas fundamentales, cónico, isométrico, diédrico y acotado, se elige el de planos acotados ya que el resto deforman las figuras al variar sus dimensiones en las distintas direcciones.

En el sistema acotado se representan los diversos puntos del espacio tomando un plano horizontal arbitrariamente elegido, que se le denomina plano de comparación. Sobre él se proyectan ortogonalmente, los diversos puntos. De este modo se sustituye la figura del espacio de tres dimensiones, por su proyección en el plano de dos dimensiones.

La representación, ha de cumplir otro objetivo fundamental y es que sea reversible, es decir, que a partir de la proyección seamos capaces de deducir la forma en el espacio. Para ello se precisa de un elemento más, que es la distancia c que existe entre cada punto y su proyección, y que se denomina cota.

La cota puede ser positiva o negativa, según el punto A se encuentre por encima o por debajo del plano de comparación. En la representación topográfica el plano de comparación ha de tomarse lo suficientemente bajo

para que todas las cotas sean positivas.

1.4. PARTES DE LAS QUE CONSTA UN LEVANTAMIENTO.

Como se ha visto en la proyección acotada, los puntos vienen determinados por su proyección horizontal y por su cota. De ahí, que todos los levantamientos topográficos consten de dos partes:

Planimetría, que consiste en el conjunto de operaciones necesarias para llegar a obtener la proyección horizontal.

Altimetría, que consiste en determinar la cota de los puntos necesarios o las curvas de nivel.

A veces ambos trabajos se hacen por separado utilizando instrumentos diferentes, pero generalmente suelen hacerse simultáneamente, empleando un mismo instrumento; este método se denomina taquimetría y el trabajo así efectuado se le conoce con el nombre de levantamiento taquimétrico.

La realización del levantamiento taquimétrico se realiza en dos etapas bien diferenciadas:

Trabajo de campo: consiste en tomar sobre el terreno los datos necesarios, de forma que se sitúan los instrumentos en los puntos elegidos, lo que se denomina hacer estación, y se anotan las observaciones en impresos especiales llamados libretas taquimétricas.

Trabajo de gabinete: se calculan en las libretas las distancias reducidas, los desniveles y las coordenadas de los puntos visados, realizando todas las operaciones precisas hasta dejar dibujado el plano.

1.5. CONCEPTO DE GEODESIA.

La Geodesia es la ciencia que tiene por objeto el estudio de la forma y las dimensiones de la Tierra.

El primero en admitir la esfericidad de la Tierra fue Pitágoras en el año 550 a.C. y más tarde Eratóstenes determinó por primera vez el radio de la Tierra en el año 250 a.C.

En 1687 Newton enunció el siguiente principio universal: la forma de equilibrio de una masa fluida homogénea sometida a las leyes de gravitación universal y girando alrededor de un eje, es un elipsoide de revolución aplastado por los polos. Sin embargo este principio no se cumple en la Tierra, ya que las masas internas no son homogéneas.

Por ello se admite como forma de la Tierra la superficie en equilibrio materializada por los mares en calma, denominada geoide; es una superficie física real y sobre la cual la gravedad en todos sus puntos es normal a ella.

Para los cálculos geodésicos se elige un punto fundamental o datum en el que la normal al geoide coincide con la normal al elipsoide. En este punto las dos superficies, elipsoide y geoide son tangentes.

1.6. LA APROXIMACIÓN A LA FORMA DE LA TIERRA.

Debido a la imposibilidad de materializar la superficie real de la Tierra por una expresión matemática, su estudio se realiza adoptando distintas superficies de aproximación, como la esfera y el elipsoide de revolución.

1.6.1. EL GEOIDE.

El geoide es la representación del nivel medio de los mares y océanos en calma prolongados por debajo de los continentes. Esta superficie es en cada punto normal a la dirección de la gravedad. Es una superficie real y equipotencial. La expresión matemática que lo define es muy compleja para utilizarla en Cartografía como superficie de referencia, por ello y para simplificar el problema se utilizan una figuras aproximadas al geoide.

1.6.2. LA APROXIMACIÓN ESFÉRICA.

Se utiliza para simplificar los cálculos, aunque por todos es sabido que la superficie terrestre difiere mucho de una esfera.

1.6.3. EL ELIPSOIDE DE APROXIMACIÓN.

El elipsoide de referencia es una superficie arbitraria que sirve de fundamento para el cálculo de la situación de los puntos geodésicos y para determinar con respecto a ella la configuración del geoide.

Hasta 1924, venía utilizando cada Nación el elipsoide que mejor se adaptaba a su superficie, y así la geodesia española se refirió al elipsoide de Struve. En 1924, se adoptó para todo el mundo como superficie de referencia el elipsoide de Hayford.

En el elipsoide de referencia, se denominan meridianos las secciones producidas en ella por cualquier plano que contenga al eje de revolución, y se denominan paralelos a las circunferencias producidas por la intersección del elipsoide con planos perpendiculares a su eje. Al paralelo mayor, que contiene el centro del elipsoide, se le denomina Ecuador; los extremos del eje constituyen los polos Norte y Sur.

1.7. ELEMENTOS GEOGRÁFICOS EN LA SUPERFICIE APROXIMADA.

Se toma como superficie aproximada la esfera, en ella se define:

La línea de los Polos PP', que es la recta alrededor de la cual gira la Tierra, dando lugar a los meridianos que son los círculos máximos que pasan por la línea de los Polos.

El Ecuador QQ', que es el círculo máximo perpendicular a dicha recta, PP', y da lugar a los paralelos que son los círculos menores paralelos al Ecuador.

Para situar sobre la superficie de la Tierra los distintos vértices o lugares, se tomó un sistema de referencia constituido por el plano del Ecuador y por el meridiano de cierto lugar, que por acuerdo internacional es el del Observatorio de Greenwich, G.

Con estos dos planos fundamentales, un cierto lugar M se define por dos números (diferencia de longitud) y (latitud geográfica), estableciendo una correspondencia entre cada par de números y los distintos puntos en la esfera.

La diferencia de longitud. $\therefore$ es el ángulo medido en el Ecuador entre el meridiano de Greenwich y el meridiano del punto M, se mide entre 0 y 1800 al Este o al Oeste de Greenwich, correspondiendo a la longitud positiva o negativa respectivamente.

La latitud geográfica. $\therefore$ es el ángulo medido en el meridiano del punto M entre el punto y el Ecuador.

1.8. LAS PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS.

La Cartografía es la ciencia que estudia la representación plana de la esfera o del elipsoide, tratando de obtener por el cálculo, las coordenadas de los puntos del plano correspondientes a los situados en dichas

superficies.

La dificultad que existe para la representación de estos puntos, es que la Tierra no puede representarse sobre un plano sin que sufra deformaciones. A pesar de ello, se ha de intentar que la representación conserve el mayor número de propiedades métricas, que al no poderse dar todas simultáneamente, se elegirán en función de la utilidad que se vaya a dar a la carta o al mapa.

Cuando una proyección conserva la distancia, se llama equidistante y a las líneas se las llama automecóicas; por tanto esas direcciones conservan la escala. Las líneas que no conservan esta propiedad tienen anamorfosis lineal. Las proyecciones que conservan los ángulos se las denomina conformes y el no cumplimiento de esta regla por dos rectas que se cortan, se llama anamorfosis angular. Por último, los sistemas que conservan la superficie, se les llama equivalentes y las proyecciones que no cumplen esta regla tienen anamorfosis superficial.

Las ecuaciones de las dos superficies, esfera y elipsoide, nos indican que pueden ser desarrolladas sobre un plano, por ello, la necesidad de la Cartografía. Según definición internacionalmente adoptada, proyección es la correspondencia matemática biunívoca entre los puntos de una esfera o elipsoide y sus transformados en un plano. Esta correspondencia se expresa en función de las coordenadas geográficas (longitud y latitud), de cada punto del elipsoide y se traducen en el plano en coordenadas cartesianas (X, Y). La correspondencia será puntual y biunívoca entre los puntos del plano y del elipsoide.

1.8.1. PROYECCIONES PLANAS.

En los casos en que sólo se pretende representar a una parte muy limitada de la superficie terrestre, la práctica general ha sido considerarla como plana y prescindir de las proyecciones. Esto no es posible sin graves deformaciones más que dentro de superficies pequeñas, que en todo caso se limitan por un contorno (rectángulo, cuadrado o trapecio) y cuyos vértices tienen coordenadas de acuerdo con algún sistema de proyección.

Hay varios tipos de proyecciones planas dependiendo de la posición del vértice de proyección:

1. Estereográfica. El vértice de proyección es el punto diametralmente opuesto al de tangencia del plano de proyección; es una proyección plana muy empleada en Cartografía. Suponiendo la Tierra esférica puede elegirse arbitrariamente el vértice de proyección, pero nos limitaremos a estudiar el caso de que éste sea uno de los Polos terrestres (estereográfica polar). En esta proyección se cumple que los meridianos son rectas concurrentes y los paralelos son circunferencias concéntricas. La escala aumenta hacia la periferia y no se puede representar toda la Tierra.

Este sistema se emplea generalmente para representar las regiones polares y para las cartas de navegación aeronáuticas.

2. Gnomónica. El vértice de proyección se encuentra en el centro de la Tierra; se puede representar menos de la mitad de la Tierra y la escala aumenta hacia periferia. Cualquier recta de la proyección corresponde a un círculo máximo. Por tanto el camino más corto en la esfera es una línea recta en el mapa (ortodrómica).

3. Ortográfica. El punto de vista se encuentra en el infinito; se puede representar justo la mitad de la superficie terrestre y la escala disminuye hacia la periferia.

4. Escenográfica. El vértice de proyección está situado a una distancia mayor que el diámetro de la esfera y diametralmente opuesto al punto de tangencia del plano de proyección. La escala aumenta hacia la periferia.

1.8.2. DESARROLLOS CILÍNDRICOS.

En el paso de la esfera al plano se hace por medio de un cilindro. Dentro de este tipo de proyecciones destacan dos muy utilizadas en Topografía.

1. Proyección de Mercator. Se utilizó en 1569 y el gran avance fue que conservaba los ángulos, transformando los meridianos y paralelos en una red rectangular.

Se trata del desarrollo de un cilindro circunscrito al Ecuador terrestre, sobre el que se van espaciando los paralelos al aumentar las latitudes. En esta proyección no son representables los Polos.

2. Proyección U.T.M. (Universal Transversa Mercator). Se basa en la proyección de Mercator en la que el cilindro es tangente a un meridiano, considerando la Tierra como un elipsoide de revolución tangente internamente a un cilindro y cuyo eje está situado en el plano del Ecuador. El elipsoide de referencia elegido es el de Hayford.

Su universalidad se logra empleando distintos cilindros, correspondientes a varios meridianos separados entre sí 6°; cada huso de 6° emplea un cilindro distinto. Estas fórmulas son válidas para todo el mundo, representando la totalidad del globo en 60 husos iguales. El meridiano de Greenwich separa los husos 30 y 31, estando España comprendida entre los husos 28, 29, 30 y 31. Las condiciones que se imponen en esta proyección son:

Debe conservar los ángulos, es decir, debe ser conforme.

El meridiano central ha de ser automecánico, es decir, no puede tener deformación lineal.

El Ecuador y el meridiano central de cada huso se representarán por líneas rectas.

El origen de coordenadas en la proyección será el correspondiente a la intersección del Ecuador y el meridiano central del huso.

Los casquetes polares no se suelen representar en U.T.M., quedando limitado su empleo a latitudes menores de 80°.

A partir de la intersección del meridiano central del huso y el Ecuador, se construye una cuadrícula cienkilométrica de forma que un punto en la superficie terrestre queda representado en el mapa con unas coordenadas universales.

En todos los mapas con coordenadas U.T.M., se tienen tres referencias: Norte magnético, Norte geográfico y Norte de la cuadrícula U.T.M. El ángulo entre el Norte de la cuadrícula y el Norte geográfico se llama convergencia de meridianos. El ángulo entre el Norte magnético y el Norte geográfico se llama declinación, que puede ser:

Positiva si el Norte magnético está al Este del Norte geográfico.

Negativa si el Norte magnético está al Oeste del Norte geográfico.

El Norte magnético es variable por lo que es importante indicar la fecha de realización del mapa y su variación anual.

1.8.3. PROYECCIONES POLIÉDRICAS.

Cuando se emplean diversos planos tangentes según se van representando zonas próximas, el conjunto forma una superficie poliédrica y de ahí el nombre de esta proyección.

En esta proyección se realizó el Mapa Topográfico Nacional. Cada hoja del Mapa se consideraba limitada por dos paralelos separados entre sí 10' y las proyecciones se realizaban sobre planos tangentes al elipsoide de Struve.

Este sistema de proyección, no siendo conforme ni equivalente, presenta sin embargo anamorfosis insignificantes dentro de cada hoja y permite establecer un sistema de coordenadas planas en cada una de ellas sin que se aprecien errores de distancias ni angulares. El problema está en unir las hojas concurrentes, ya que no cubren todo el espacio dejando un ángulo vacío.

1.8.4. PROYECCIONES CÓNICAS.

En este tipo de proyecciones la más importante en Topografía es la proyección **Lambert**. En ella el paso de la esfera se efectúa a través de un cono circunscrito a lo largo de un paralelo. Posteriormente este paralelo se desarrolla sobre un plano que es automecoico.

Esta proyección fue reglamentaria de los mapas militares a gran escala, eligiéndose en principio el cono tangente a lo largo del paralelo de latitud 40°. La cartografía militar española ha empleado durante mucho tiempo las coordenadas y la cuadrícula de este sistema. Como ejes se eligieron el meridiano de Madrid como eje OY y la recta perpendicular en su intersección con el paralelo 40° como eje OX.

Para evitar coordenadas negativas se traslada el eje X a 600 km. al Oeste y el eje Y a 600 km. al Sur, es decir que la intersección de los ejes antes descritos tiene como coordenadas X=600 e Y=600.

1.9. REDES GEODÉSICAS: OBSERVACIÓN E IMPLANTACIÓN.

Para la realización del mapa topográfico son fundamentales las operaciones geodésicas, con las que se logra determinar la posición de una serie de puntos, que deben situarse con la mayor precisión posible porque van a servir de base para todos los trabajos posteriores. Estos puntos primordiales forman una red que cubre la zona representada y reciben el nombre de vértices geodésicos.

En estos triángulos, por los métodos de la Geodesia Clásica, se miden con el mayor rigor sus ángulos utilizando instrumentos de gran precisión. Además ha de medirse directamente con extraordinaria minuciosidad un sólo lado especialmente favorable, al que se le denomina base. Los otros lados no medidos directamente se calculan trigonométricamente.

Naturalmente para que estas operaciones sean posibles, cada vértice debe ser visible desde varios otros. Ésta es la única condición necesaria para la elección de estos puntos.

Los vértices de los triángulos, se marcan en el terreno construyendo hitos de grandes dimensiones, pintados de blanco para hacerlos visibles desde mucha distancia.

Con estas triangulaciones se calculan las coordenadas planimétricas (x, y). La coordenada z se denomina cota trigonométrica y tiene peor precisión que las cotas obtenidas mediante nivelación geométrica, las cuales siguen un proceso independiente de la red geodésica.

1.10. PROCESO DE DENSIFICACION. ENLACE DE REDES.

En el cálculo de estas redes, para evitar la acumulación de errores, se forman tres mallas cada vez más densas, que se denominan triangulación de primer, segundo y tercer orden.

La red de primer orden está constituida por grandes triángulos de lados comprendidos entre los 30 y 70 Kilómetros, pudiendo llegar como excepción a más de 200 Kilómetros.

La triangulación de segundo orden forma una red uniformemente repartida y apoyada en la de primer orden, con una longitud de los lados de los triángulos variable de 10 a 25 Kilómetros. Queda distribuida de modo que todos los vértices de primer orden lo sean también de segundo.

La red de tercer orden tiene lados de 5 a 10 Kilómetros, utilizándose también como vértices de tercer orden todos los de primero y de segundo.

Forman parte de la red fundamental las cadenas del Archipiélago Balear con la Península, los grandes cuadriláteros que ligan nuestra costa sur con Argelia y Marruecos y la cadena denominada del meridiano de Tetuan, que como prolongación de nuestra red, enlaza a través del Estrecho con la red geodésica Marroquí. El archipiélago Canario posee una red fundamental propia que liga las islas entre sí y con el Continente Africano.

1.11. LA RED ACTUAL.

Los trabajos geodésicos, cuyo objetivo fue la formación del mapa nacional en escala 1/50.000, se iniciaron en 1858, finalizándose la observación de la red de primer orden fundamental y complementaria, incluidos el enlace Balear y el cuadrilátero Hispano-Argelino, en los primeros años del presente siglo hacia 1915. La cadena del meridiano de Tetuan fue observada en los años 1928-1929 y la del Archipiélago Canario en 1925-1930.

El punto fundamental o datum de nuestra red, lo constituye el Observatorio Astronómico de Madrid, cuyo meridiano fue utilizado también como origen de longitudes.

La escala fue proporcionada por la base central de Madriles (Toledo), medida en 1858 con la regla bimetálica de Ibáñez de cuatro metros.

El cálculo de coordenadas geográficas de los vértices se efectuó partiendo del datum Madrid y tomando como superficie de referencia el elipsoide de Struve. Posteriormente en 1950, se llevó a cabo una compensación matemática de errores por el método de mínimos cuadrados, conjuntamente con las restantes redes geodésicas de Europa Occidental y se adoptó como nuevo datum el vértice Postdam (Alemania), el meridiano de Greenwich como origen de longitudes, el elipsoide internacional de referencia Hayford, según el acuerdo de la asamblea de la Asociación Geodésica Internacional celebrada en Madrid en 1924.

1.12. RESEÑAS DE LOS VÉRTICES GEODÉSICOS.

La reseña de un vértice geodésico es una ficha con toda la información de dicho punto, es decir, nombre del vértice, Término Municipal al que pertenece, croquis de acceso, la proyección en la que se han calculado sus coordenadas y el valor de dichas coordenadas.

Tan importante como estos datos es conseguir localizar el vértice. Para ello se realiza una descripción escrita de su situación y de cómo llegar, junto con un croquis. Para que no haya lugar a dudas se suele acompañar de una foto, en la que se vea además del vértice el entorno del mismo. De este modo cuando se va a realizar un trabajo en el que se necesite apoyar en alguno de los vértices conocidos se tiene su situación y sus coordenadas.

La red de nivelación tiene otro tipo de fichas con nombre y la situación de los clavos, nivel de precisión de la red y su cota referida al Nivel Medio del Mar en Alicante.