

Nociones sobre Sistemas de Referencia y Proyecciones Cartográficas

por José Luis García Pallero

A Posicionamiento de puntos en el espacio

Para la determinación de las coordenadas de los puntos de la superficie de la Tierra en un sistema de referencia único de aplicación general para todo el planeta, es imprescindible el estudio de la figura de la Tierra.

La definición de un sistema de referencia único ha sido -y es- uno de los principales problemas de la Geodesia, si bien la llegada de los sistemas de posicionamiento por satélite ha supuesto una revolución en cuanto a los métodos de medición, exactitud y precisión de los resultados.

En los siguientes epígrafes se van a describir brevemente algunos conceptos básicos con el fin de establecer un marco general para el problema del posicionamiento de puntos en el espacio geográfico.

A.1 Sistemas de referencia

Se denomina *Sistema de Referencia Geodésico* al conjunto de parámetros que definen una estructura geométrica para situar puntos del espacio geográfico; los mismos parámetros son necesarios para describir un modelo funcional para la realización de mediciones y observaciones.

A efectos de representar planimétricamente la superficie terrestre, a los sistemas de referencia geodésicos se les asocia también una superficie de forma elipsoidal como aproximación a la figura de equilibrio (geoide¹). La determinación del elipsoide de referencia incluye, además de los aspectos geométricos de forma y tamaño, parámetros físicos como la constante gravitacional, la masa terrestre total, el potencial en su superficie, la velocidad de rotación, etcétera, que también forman parte de la definición del sistema de referencia geodésico.

El modelo funcional relaciona las mediciones con las coordenadas: función distancia, función acimut, etc. La descripción rigurosa del modelo funcional exige contemplar todos los aspectos físicos que intervienen en la medición: campo gravitatorio, refracción atmosférica, aspectos geodinámicos. Gran parte de las constantes físicas necesarias para establecer el modelo funcional acompañan a la definición de sistema de referencia geodésico: velocidad de la luz, definición de la unidad de tiempo, valor del campo gravitatorio.

La descripción rigurosa del modelo funcional es importante, ya que, partiendo de las mismas mediciones, dos modelos funcionales diferentes producirán para un punto coordenadas diferentes. Además, considerar unas determinadas constantes físicas en un sistema de referencia también puede influir en las mismas mediciones. Por ejemplo, una medición electrónica de distancias se basa en la propagación de una onda electromagnética y la distancia resultante es un valor obtenido a partir de considerar un cierto valor para la velocidad de propagación de la luz en el vacío. Si se adopta un valor distinto, las distancias cambian, la escala del sistema cambia y, en definitiva, cambian las coordenadas.

¹Superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre, que se toma como cota cero en la determinación de altitudes, que entonces se llamarán **alturas ortométricas**. La materialización aproximada del geoide sería una superficie que envolviera la Tierra y que resultaría de la prolongación de la superficie media de los mares a través de los continentes, y que sería normal a todas las líneas de fuerza del campo gravitatorio. La separación del geoide con respecto al elipsoide se denomina ondulación, N.

A.2 Sistemas locales y sistemas globales

Una clasificación básica de los sistemas de referencia geodésicos es aquella que se refiere al grado de cobertura de la superficie del globo a la que afectan, distinguiéndose así dos tipos:

- Sistemas de referencia locales. Se definen únicamente para una porción de la superficie terrestre como puede ser una región, un país o un continente. Tienen la ventaja de minimizar los errores en la definición de puntos en una zona concreta, aunque fuera de esa zona los sistemas locales no son útiles porque pierden precisión.
- Sistemas de referencia globales. Afectan a todo el planeta, minimizando el error medio de la definición de puntos en el conjunto de la Tierra.

A.3 Datum geodésico

Se denomina Datum Geodésico al conjunto mínimo de parámetros que permiten definir de forma única la situación y orientación de un sistema de referencia geodésico. Un mismo sistema de referencia puede tener varios datum equivalentes que lo definan.

Existen diferentes formas de definir un sistema de referencia geodésico:

- Especificando la situación del origen y orientación de los ejes de un sistema cartesiano.
- Mediante un conjunto de puntos materializados sobre el terreno y dotados de coordenadas respecto a un sistema de referencia geodésico.
- Mediante unos parámetros de transformación que permitan relacionar el sistema de referencia con otro ya existente, previamente definido.

La primera forma es una definición física del sistema, ya que exige la determinación de ciertos aspectos relacionados con la geodinámica terrestre: geocentro, eje de rotación. **El sistema de referencia en el que se apoya el sistema GPS viene definido de esta forma.**

Para fines prácticos, las instituciones geodésicas suelen proporcionar el datum en las formas descritas en los dos últimos puntos.

A.4 Marco de referencia geodésico

Tal como se ha definido, un sistema de referencia geodésico es algo abstracto. La definición convencional del mismo viene dada por un conjunto de puntos materiales dotados de posición en el teórico sistema referencia, posición expresada en un determinado sistema de coordenadas. A dicho conjunto de puntos dotados de coordenadas se le denomina Marco de Referencia Geodésico.

El marco de referencia geodésico lleva a su vez implícito el datum geodésico. Por ello, disponer de una serie de puntos dotados de coordenadas respecto a un mismo sistema de referencia constituye una de las formas habitualmente empleadas en geodesia para definir el datum.

Por ejemplo, **en el sistema GPS son los propios satélites los que definen el marco de referencia**, y no existen puntos materiales sobre la superficie terrestre, en el sentido de los clásicos vértices geodésicos.

A.5 Sistemas de coordenadas

En cualquier espacio afín euclídeo, donde se haya definido un sistema de referencia, se pueden utilizar diferentes sistemas de coordenadas para parametrizar las posiciones en el espacio. Un sistema de coordenadas es una creación artificial para permitir la definición analítica de un objeto o de un fenómeno. Existen múltiples opciones para definir analíticamente la situación

geométrica de un elemento y, por tanto, es posible elegir entre diferentes sistemas de coordenadas.

Desde el punto de vista puramente matemático, cualquier sistema de coordenadas es admisible. Desde un punto de vista práctico, la única razón para seleccionar un sistema de coordenadas en particular suele ser el hecho de que una determinada cuestión objeto de estudio aparezca en su forma más simple, geoméricamente interpretable y susceptible de ser medida.

Dado un sistema de referencia geodésico, la posición geográfica de un punto se puede expresar según distintos sistemas de coordenadas, que en geodesia se acostumbran a clasificar según diversos criterios:

- En función de la *situación del origen*:
 1. Sistemas de coordenadas geocéntricos. Son sistemas de coordenadas cuyo origen se encuentra situado en el centro de masas terrestre.
 2. Sistemas de coordenadas casi geocéntricos. Son sistemas de coordenadas cuyo origen está situado en las proximidades del centro de masas terrestre, pero no exactamente en él.
 3. Sistemas de coordenadas topocéntricos. Son sistemas de coordenadas cuyo origen está situado en algún punto de la superficie terrestre.
- En función del *tipo de coordenadas*:
 1. Coordenadas cartesianas:
 - Coordenadas cartesianas globales, (X,Y,Z).
 - Coordenadas cartesianas locales, (x,y,z)².
 2. Coordenadas curvilíneas:
 - Coordenadas esféricas, (latitud θ , longitud ϕ , radio r).
 - Coordenadas astronómicas, (θ , ϕ , W).
 - Coordenadas geodésicas con altitud elipsoidal, (θ , ϕ , h).
 - Coordenadas geodésicas con altitud ortométrica, (θ , ϕ , H).
 3. Coordenadas en una proyección cartográfica:
 - Coordenadas sobre una proyección cartográfica con altitud elipsoidal, (x,y,h).
 - Coordenadas sobre una proyección cartográfica con altitud ortométrica, (x,y,H).

B Sistemas de referencia geodésicos de interés para Castilla y León

B.1 El sistema ED50

El sistema ED50 (European Datum 1950) es el sistema de referencia que ha estado vigente en la geodesia y cartografía españolas (excepto en las Islas Canarias), tanto en el ámbito civil como en el militar desde el año 1970 (Decreto 2303/1970), hasta el año 2007 (Real Decreto 1071/2007). El sistema ED50 fue obtenido por el procedimiento tradicional de adaptar un elipsoide al geoide en una determinada zona, en este caso Europa Occidental.

²Que en algunos textos vienen identificadas como (e,n,u): east, north, up

B.2 El sistema WGS84

En contraste con los sistemas de referencia geodésicos clásicos, de carácter local, surgen los sistemas de referencia globales, entre los que se encuentra el WGS84, empleado para definir las órbitas recorridas por los satélites GPS, las cuales son la base del posicionamiento con esta técnica.

Desde que en 1957 se iniciara la era espacial con el lanzamiento de los primeros satélites artificiales, se planteó la necesidad de establecer sistemas y marcos de referencia geodésicos globales, con el objetivo inicial de determinar sus órbitas. Uno de los primeros fue el WGS60 definido por el Departamento de Defensa de EEUU. Sucesivamente fue mejorado al definir los sistemas WGS66 y WGS72 y culminando finalmente con el WGS84.

El WGS84 se define mediante los siguientes parámetros:

- Origen coincidente con el geocentro, incluyendo los océanos y la atmósfera ($\sigma 2m$).
- Eje Z en la dirección del CTP³, tal como lo definió el BIH⁴ para la época 1984.0.
- El eje X es la intersección del plano meridiano de Greenwich, definido por el BIH para la época 1984.0, y el plano del ecuador referido al CTP.
- Eje Y perpendicular a los anteriores formando una terna dextrógira.
- El elipsoide utilizado como referencia tiene como parámetros:

$$a=6378137.0 \quad f=1/298.257223563$$

B.3 El sistema ITRS

El Sistema de Referencia Terrestre Internacional, ITRS, es mantenido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS). El IERS fue creado en 1987 por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y por la Unión Astronómica Internacional (IAU).

El ITRS queda definido por los siguientes parámetros:

- El origen es el geocentro o centro de masas de la Tierra, incluyendo los océanos y la atmósfera.
- La escala está ligada a la unidad de medida en el Sistema Internacional, el metro.
- La orientación de los ejes fue la acordada por el BIH en la época 1984.0.
- Su evolución en orientación con el tiempo no crea rotación global residual con relación a la corteza terrestre.

El ITRS se materializa mediante sucesivos marcos de referencia denominados, de forma genérica, ITRF. Los ITRF son los marcos de referencia más precisos utilizados hoy en día.

Las técnicas de medición utilizadas permiten determinar las coordenadas cartesianas geocéntricas de todas las estaciones con una precisión absoluta que oscila entre $\sigma 0.5cm$ y $\sigma 2cm$. Con esta precisión es posible medir, entre otros aspectos de la dinámica terrestre, el movimiento de las placas tectónicas. Por ello, las estaciones están repartidas sobre doce de las placas más grandes, aunque el hemisferio sur tiene menor densidad.

Debido a la alta precisión de las mediciones y a la progresiva inclusión de nuevas estaciones, es necesario determinar periódicamente nuevas soluciones para las coordenadas de las estaciones, así como las velocidades de desplazamiento o deformación de las mismas. Cada una de las soluciones obtenidas se identifica con

³Conventional Terrestrial Pole

⁴Bureau International de l'Heure

la palabra ITRF más dos dígitos que identifican el año: ITRF89, ITRF97, ITRF00, etcétera.

B.4 El sistema ETRS

EUREF es una subcomisión de la IAG⁵ encargada del marco de referencia geodésico para Europa. EUREF fue fundada en 1987 en la Asamblea General de la IUGG⁶, celebrada en Vancouver.

EUREF recibió el encargo de encontrar la definición adecuada del sistema de referencia geodésico para Europa y su correspondiente marco de referencia. En la reunión celebrada por la IAG en Florencia en el año 1990, EUREF estableció en su resolución primera que las coordenadas ITRF89 de las 36 estaciones europeas ITRS definieran el Sistema de Referencia Terrestre de Europa de 1989 (ETRS89) y dicha materialización se denominó Marco de Referencia Terrestre de Europa de 1989 (ETRF89).

Como el número de vértices del marco de referencia era insuficiente para fines cartográficos y topográficos, ETRF89 se densificó posteriormente mediante campañas GPS y, a partir de 1995, mediante la Red de Estaciones Permanentes (EPN).

La razón fundamental para adoptar ETRS89 como sistema de referencia europeo es que es necesario disponer de un sistema lo más estable posible en el tiempo, por lo que para evitar la influencia del movimiento de la placa tectónica europea, se eligen puntos sobre la misma.

La disponibilidad de puntos monumentados para el ITRS se califica como parcial porque son puntos en los que no se puede estacionar, ya que en ellos hay siempre un receptor observando permanentemente y, además, junto con las coordenadas es necesario utilizar el modelo de velocidades. En cambio el acceso físico a ETRS89 es total, ya que está densificado mediante redes geodésicas con monumentación tradicional y basta con emplear directamente las coordenadas de cada punto, en los que la velocidad de desplazamiento relativa se considera nula. Por tanto, el ETRS89 es más práctico para fines topográficos y cartográficos.

Con la publicación el 29 de agosto de 2007 del Real Decreto 1071/2007, se adopta el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. En el caso de las Islas Canarias, se adopta el sistema REGCAN95. Ambos sistemas tienen asociado el elipsoide GRS80 y están materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE, y sus densificaciones.

B.5 Mediciones y precisión

Para realizar mediciones topográficas con precisión adecuada hay que tener en cuenta, como conclusión, los siguientes aspectos:

- Para realizar un levantamiento topográfico respecto a un determinado sistema de referencia geodésico las mediciones han de estar enlazadas al correspondiente marco de referencia que lo materializa.
- La precisión del sistema de referencia geodésico en una determinada zona se corresponde con la precisión de las coordenadas que localmente presenta el marco de referencia.
- La precisión del marco de referencia depende de la calidad de la red geodésica llevada a cabo para su establecimiento.

⁵International Association of Geodesy

⁶International Union of Geodesy and Geophysics

C Proyecciones cartográficas

El objeto de una proyección cartográfica es la representación sobre un plano de una porción o de la totalidad de la superficie de referencia utilizada como aproximación a la forma de la Tierra.

El problema al realizar esta representación es la imposibilidad de desarrollar una superficie esférica o elipsoidal sobre un plano sin forzar una deformación de la superficie original. Aun así, determinadas proyecciones mantienen inalterada alguna característica geométrica que puede ser de mucha utilidad dependiendo del objetivo buscado.

Según las magnitudes que conserven, las proyecciones cartográficas pueden clasificarse como sigue:

- Proyecciones conformes, que conservan los ángulos.
- Proyecciones equidistantes, que conservan las distancias.
- Proyecciones equivalentes, que conservan las superficies.

C.1 La proyección UTM

El decreto 2303/1970, en su artículo primero dispone: *“Para la revisión y nueva edición del Mapa Topográfico Nacional en escala 1:50000 y para la restante cartografía que publique el Instituto Geográfico y Catastral, se adopta como reglamentaria la proyección Universal Transversal de Mercator (U.T.M.), única que será utilizada en lo sucesivo. La distribución en husos y zonas será la internacional”*.

Dentro de los distintos sistemas de proyección, el sistema UTM se clasifica entre las proyecciones conformes, es decir, se conservan en el plano los ángulos entre las líneas de la superficie elipsoidal original. En cambio, aparecen distorsiones en la medida de distancias y superficies.

Esta proyección se basa en un desarrollo cilíndrico de la superficie de referencia terrestre. El citado cilindro se apoya en el elipsoide terrestre de forma transversal, es decir, con su generatriz apoyada en el plano del ecuador. El cálculo matemático de la proyección de los puntos sobre el cilindro se basa en un desarrollo en serie de una función de variable compleja.

Un desarrollo cilíndrico transversal utilizado para toda la superficie de referencia tiene el inconveniente de que, a medida que se produce una separación en longitud del meridiano de tangencia, las deformaciones aumentan hasta llegar a cotas inadmisibles.

La universalidad se consigue recurriendo al artificio de subdividir la superficie de referencia en 60 husos iguales de 6 grados de amplitud. En cada huso se considerará un desarrollo cilíndrico transversal. Se tendrán, por tanto, 60 proyecciones iguales, pero referida cada una de ellas al meridiano central del huso respectivo y al ecuador. Dado que la superficie de referencia es una superficie de revolución, las expresiones matemáticas para el trabajo con esta proyección serán iguales para los 60 husos. Para particularizar para un huso cualquiera no hay más que tomar la longitud del meridiano central correspondiente. El primer huso comprende las longitudes. Los restantes husos crecen a partir del primero en dirección este; de esta forma, el meridiano de Greenwich es el límite entre los husos 30 y 31.

En España, al encontrarse en el hemisferio norte, el valor de la coordenada y de la proyección siempre tendrá valores positivos (la coordenada y tiene valor 0 en el ecuador). Para evitar valores negativos de la coordenada x, se asigna por convenio un valor x de 500.000 m al meridiano central de cada Huso.