



Toma básica de datos en Geología

Mediciones en el campo y manejo de mapas topográficos y geológicos

J. I. Peláez Fernández

Introducción, objetivos y equipo para la toma de datos geológicos en el campo

La Geología, como ciencia que estudia el origen, la formación y la evolución de la Tierra, se basa en la descripción y análisis de los distintos materiales que la componen y de la estructura que presenta. En superficie, esta información se obtiene de forma directa en los lugares donde son visibles o afloran estos materiales (el sustrato rocoso). Por eso se les denomina afloramientos.

Una vez identificado un afloramiento, el primer paso es hacer un reconocimiento general del mismo, definiendo sus límites, las variaciones litológicas principales y la estructura general. Esto permitirá definir puntos significativos con la información más relevante, y que será necesario situar con precisión. En la actualidad, esto se consigue fácilmente con la utilización de receptores portátiles que captan las señales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS). Conocer las características y principios básicos de funcionamiento de los sistemas GNSS es necesario para poder utilizar y configurar de forma adecuada estos dispositivos, de tal forma que se puedan obtener unas coordenadas precisas de los puntos elegidos. Este es uno de los temas tratados en este trabajo y constituye uno de sus objetivos.

Una tarea adicional importante que realizar en un afloramiento es la de identificar y medir todas las superficies y lineaciones geológicas que se consideren importan-

tes. Para ello, se usa una brújula con clinómetro (o una brújula y un clinómetro separados) y, ocasionalmente, un transportador de ángulos. Todas las descripciones, obtención de coordenadas y mediciones que se hagan en el afloramiento deberán ser anotadas de forma adecuada en un cuaderno de campo. Es otro de los temas tratados en el presente trabajo, constituyendo otro de sus objetivos.

El último paso será la anotación de todos estos datos, mediante símbolos gráficos y numéricos, en un mapa topográfico de la zona, que es la base para la realización del mapa geológico. Para manejar los mapas topográficos es fundamental tener un conocimiento básico de los sis-

temas y marcos geodésicos de referencia (o redes geodésicas), así como de los tipos de coordenadas que se utilizan en la actualidad (principalmente geográficas angulares y universal transversa de Mercator o UTM). Este tema también forma parte de este trabajo como último de sus objetivos.

Para los estudios de campo, aparte de la brújula, del transportador de ángulos, del receptor GNSS y del cuaderno, mencionados anteriormente, es importante disponer también de una lupa geológica de mano, un martillo de geólogo, un cincel, una cinta métrica, bolsas para muestras de diferente tamaño, una cámara fotográfica, una pequeña regla o escalímetro y varios marcadores.



Figura 1. Equipo básico utilizado en los trabajos geológicos de campo.

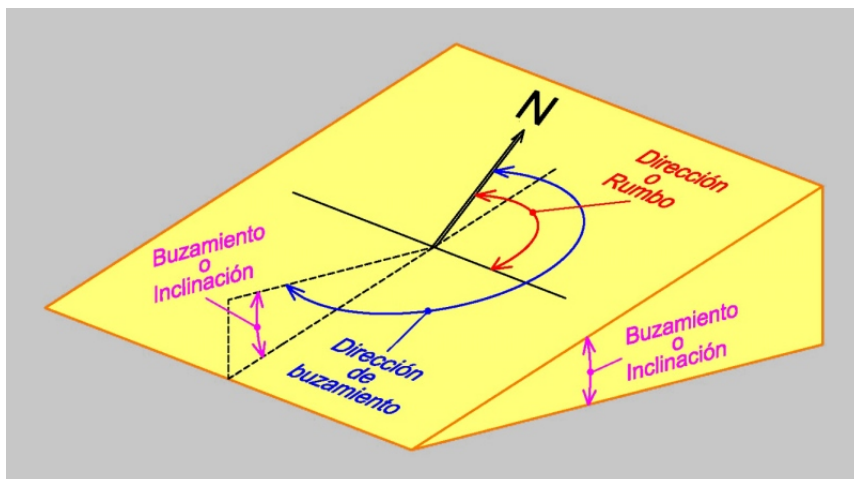


Figura 2. Concepto y forma de medir la dirección o rumbo, la dirección de buzamiento o azimut y el buzamiento o inclinación.

Medición de superficies y lineaciones geológicas en el campo

Como ya hemos visto, una de las tareas básicas en cualquier estudio geológico es la medición de direcciones y buzamientos sobre las distintas superficies y lineaciones.

En un afloramiento rocoso vamos a encontrar dos tipos básicos de estructuras o geometrías a medir: **superficies planares** y **lineaciones u orientaciones**.

Medición de superficies planares

Hay dos maneras de medir las superficies planares (como superficies de estratos, planos de falla, juntas o diaclasas):

1. Midiendo su **dirección o rumbo** (*strike*) y su **buzamiento o inclinación** (*dip*).
2. Midiendo su **dirección de buzamiento o azimut** (*dip direction, azimuth*) y su **buzamiento o inclinación** (*dip*).

La **dirección o rumbo** es el ángulo que forma una línea horizontal del plano a medir con el Norte. Su valor varía entre 0° y 180° .

La **dirección de buzamiento o azimut** es el ángulo que forma la dirección de máxima pendiente de la superficie con el norte, medido en el sentido de las agujas del reloj. Su valor varía entre 0° y 359° , para las mediciones habituales con precisión de 1° .

El **buzamiento o inclinación** de una superficie planar es el ángulo máximo que forma el plano a medir con la horizontal y que se sitúa en la dirección de máxima pendiente de dicho plano (línea que seguiría una gota de agua si se dejase caer por dicho plano). Su valor va de 0° (horizontal) hasta 90° (vertical).

En ambos casos se utiliza una brújula y un clinómetro, o bien una brújula con clinómetro incorporado.

Para la anotación de las mediciones de una superficie planar se utilizan dos métodos o técnicas principales:

a. Anotar la **dirección o rumbo**, el **buzamiento o inclinación** y el **cuadrante de orientación del buzamiento o inclinación** (*quadrant dip direction*). Un ejemplo de anotación sería **075°/40°S** (o **075/40S**). Aunque no es necesario, si tenemos en cuenta la definición de la dirección o rumbo, y para separar de forma más clara ambos tipos de notación, se puede añadir en este método la indicación del norte (N) y la orientación hacia donde se mide (E o W). La anotación sería en este caso **N075°E/40°S** (o **N075E/40S**).

b. Anotar el **buzamiento o inclinación** y la **dirección de buzamiento o azimut**. La forma de anotación internacional sería **40°/165°** (o **40/165**). En España, se suele utilizar cambiando ambos términos de lugar, es decir, **165°/40°** (o **165/40**).

En todos los casos se trata del mismo plano, aunque la forma de anotar su orientación varíe. Para evitar confusiones entre los valores de la orientación del plano y de la inclinación, se utilizan siempre 3 dígitos para el primero, añadiendo un 0 a la izquierda en caso necesario, y 2 para el segundo.

Medición de estructuras lineales

En las lineaciones geológicas (como las direcciones de corriente, ejes de pliegues o estrías y fibras de crecimiento mineral sobre planos de falla) se registran la **inmersión** (*plunge*) y la **dirección de inmersión** (*plunge direction, trend*). Para ello se usa una brújula y un clinómetro (o una brújula con clinómetro incorporado).

La **inmersión** de una lineación es el ángulo de inclinación respecto a la horizontal medido sobre el plano vertical que pasa por dicha lineación. El valor está comprendido entre 0° (horizontal) y 90° (vertical).

La **dirección de inmersión** de una lineación es la orientación respecto al norte del plano vertical sobre el que se determina el ángulo de inmersión de dicha lineación, medido en el sentido de las agujas del reloj. Su valor varía entre 0° y 359° .

Cuando la lineación a medir se sitúa sobre una superficie, se puede medir también el **cabeceo o ángulo de cabeceo** (*pitch*), que se define como el ángulo comprendido entre la dirección marcada por dicha lineación y la dirección o rumbo de la superficie planar que la contiene. Este parámetro de medida es útil para dar mayor exactitud a la medida, sobre todo para valores altos de la inclinación o buzamiento de la superficie sobre la que se sitúa la lineación. Se mide con un transportador de ángulos. El valor está comprendido entre 0° y 90° y se debe indicar también el extremo de la línea de la dirección o rumbo desde el que se midió.

La anotación de las estructuras lineales se hace indicando en primer lugar el **ángulo de inmersión** y, detrás, separado por un guión, el valor de la **dirección de dicho ángulo de inmersión**. Un ejemplo sería **30°-068°** (o **30-068**). Cuando se puede medir también el **cabeceo**, el valor de este se anota a continuación con una separación, quedando de la forma **30°-068° 55°NE** (o **30-068 55NE**).

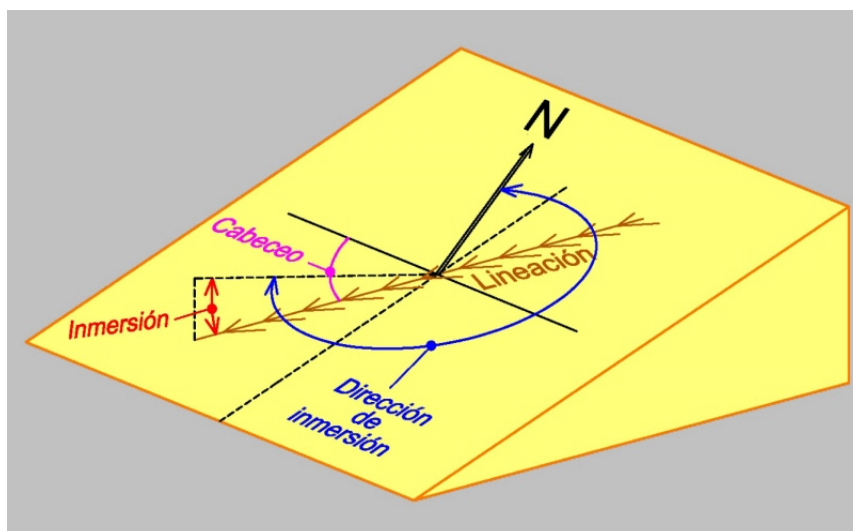


Figura 3. Concepto y forma de medir la inmersión, la dirección de inmersión y el cabeceo o ángulo de cabeceo.

Estratificación y buzamiento		
Estratificación invertida y buzamiento		
Estratificación horizontal - subhorizontal		
Estratificación vertical - subvertical		
Esquistosidad		
Esquistosidad horizontal - subhorizontal		
Esquistosidad vertical - subvertical		
Foliación		
Foliación horizontal - subhorizontal		
Foliación vertical - subvertical		
Lineación con ángulo de inmersión		
Lineación horizontal - subhorizontal		
Eje de pliegue con ángulo de inmersión		
Eje de pliegue horizontal - subhorizontal		

Figura 4. Símbolos gráficos más utilizados para la representación de las mediciones en los mapas geológicos.

La indicación del cuadrante detrás del valor se refiere a la orientación aproximada del extremo de la línea de la dirección o rumbo desde el que se midió, tal como se indicó anteriormente, pudiendo ser N, NE, E, SE, S, SW, W o NW.

Representación gráfica de las mediciones de estructuras

Las mediciones, tanto de estructuras planares como de estructuras lineales, deben ser anotadas de forma clara y ordenada en un cuaderno de campo. Las principales se representarán sobre el mapa topográfico de la zona mediante una serie de símbolos gráficos estandarizados o de uso generalizado, constituyendo una parte importante para la realización de los mapas geológicos.

Métodos de posicionamiento sobre el terreno

Hasta hace menos de veinte años, las herramientas de que se disponía para la ubicación exacta de un punto del terreno eran topográficas (utilización de aparatos como teodolitos o estaciones topográficas totales) o simplemente basadas en la observación y comparación entre los rasgos identificativos del terreno y los representados en el mapa topográfico utilizado. El primer método era largo y tedioso, y además había que contar con aparatos caros y pesados de transportar;

el segundo, por el contrario, carecía en muchas ocasiones de la precisión necesaria para un estudio riguroso.

Esto cambió con la llegada de los primeros equipos receptores portátiles capaces de captar señales de un conjunto de satélites en órbita y determinar su posición sobre la superficie terrestre. A estos sistemas o tecnologías espaciales se les denomina, de forma genérica, con las siglas GNSS (Sistemas Globales de Navegación por Satélite).

Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS)

Los sistemas GNSS se basan en las señales emitidas por los satélites, en frecuencias de radio, de forma continua y propagación esférica. La confluencia de tres de estas señales en un receptor situado sobre la superficie terrestre, más una cuarta para verificación de posibles errores, proporcionará las coordenadas de su ubicación con precisión. El cálculo de dichas coordenadas se hace, principalmente, en base a la distancia del receptor a los satélites y a la información proporcionada de su posición prevista en cada momento (efemérides). El error de cálculo de la posición va disminuyendo con la captación de señales adicionales de más satélites.

En la actualidad hay cuatro sistemas GNSS con cobertura mundial; dos opera-

tivos al 100%, el GPS de EE.UU. y el GLONASS de Rusia, y otros dos ya operativos, pero no al 100% previsto, y que se espera lo estén a lo largo de 2020, que son el GALILEO de la Unión Europea y el BEIDOU de China.

-GPS (Global Positioning System) o inicialmente NAVSTAR GPS: Desarrollado por EE.UU., fue el primer sistema GNSS (operatividad inicial en febrero de 1993 y completa en abril de 1995) y es, con diferencia, el más conocido y más implantado a nivel mundial en la actualidad. Se basa en una constelación de 31 satélites (24 operativos) que se sitúan en 6 planos orbitales elípticos casi circulares, inclinados 55° y separados entre sí 60°, a una altitud de 20.200 km. Su período orbital es de 11h 58min y está diseñado para que sean visibles al menos 5 satélites desde cualquier punto. Hay 2 estaciones principales de control y otras 16 de monitoreo distribuidas por todo el mundo. Usa como sistema geodésico de referencia y elipsoide el WGS84, y su marco de referencia actual es el ITRF. El control es militar (Departamento de Defensa y Fuerza Aérea USAF), pero dispone de un canal para uso civil, cuya señal estuvo disponible sin distorsión a partir de mayo de 2000. Su precisión se estima actualmente en unos 5 m, pudiendo llegar a 2.5 m si se captan las señales de 7 a 9 satélites.

-GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema): Desarrollado por Rusia, fue el segundo sistema GNSS en estar operativo (operatividad inicial en enero de 1996 y completa, después de una restauración del sistema tras una crisis económica, en octubre de 2011). Consta de una constelación de 31 satélites (24 siempre operativos) que se posicionan sobre 3 planos orbitales elípticos casi circulares, inclinados 64,8° y separados entre sí 120°, a una altitud de 19.100 km. Su período orbital es de 11h 15min y está diseñado para que siempre estén visibles al menos 5 de los satélites. Hay una estación de control principal y otras 4 adicionales de apoyo, más 16 estaciones de monitoreo distribuidas por el territorio de Rusia y países de su entorno. Como sistema geodésico de referencia y elipsoide utiliza uno propio, denominado PZ-90.02, pero que está ajustado al marco geodésico ITRF2000. El control es militar (Ministerio de Defensa y Fuerzas de Defensa Aeroespacial) pero dispone de un canal para uso civil que estuvo disponible a partir de 2007. Su precisión actual es bastante similar al sistema GPS, alrededor de 6m, pudiendo alcanzar un valor inferior a 3 m si se puede captar la señal de 7 a 9 satélites.

-GALILEO: Puesto en marcha por la Unión Europea, es un sistema GNSS que comenzó a funcionar en diciembre de 2016; su operatividad completa está prevista para 2020. Constará de 30 satélites (24 de ellos siempre operativos) ocupan-

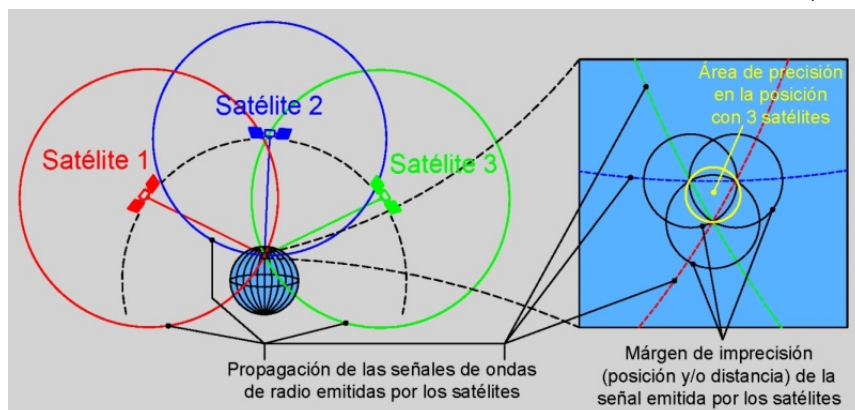


Figura 5. Esquema simplificado en dos dimensiones de la determinación de la posición sobre la superficie terrestre a partir de las señales, en frecuencias de radio, proporcionadas por al menos tres satélites.

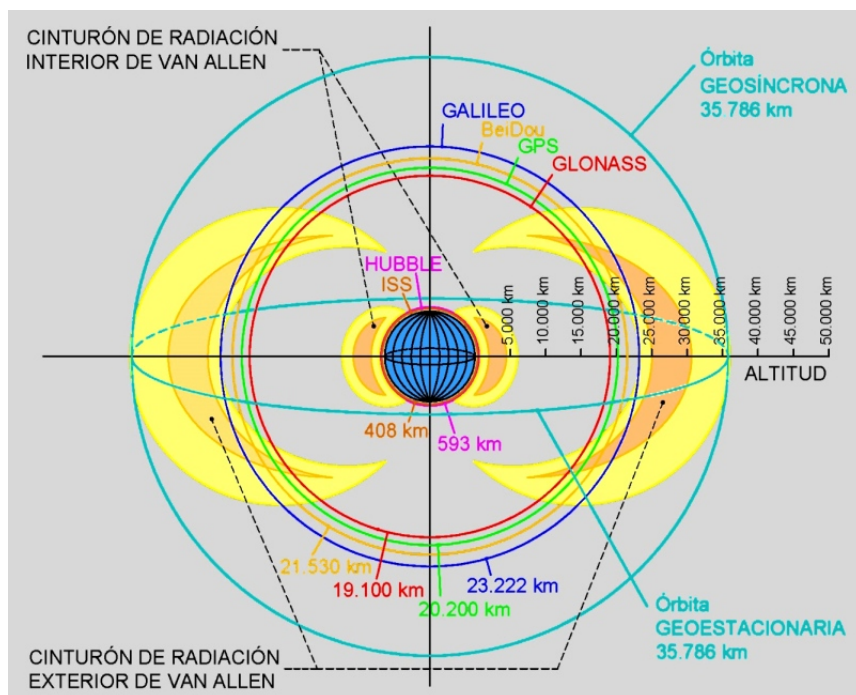


Figura 6. Esquema a escala de la posición de las órbitas de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite GNSS con cobertura mundial.

do 3 planos orbitales elípticos casi circulares (8 en cada plano orbital con 2 más en cada uno de reserva), inclinados 56° y separados entre sí 120° , a una altitud de 23.222 km. A finales de abril de 2019 están ya en órbita 24 satélites, de los que 2 están en fase de pruebas. El período orbital de los satélites es de 14h 04min y está diseñado para que estén visibles en todo momento de 6 a 8 desde cualquier lugar. El sistema también tiene la importante característica de total compatibilidad con los sistemas GPS de EE.UU. y GLONASS de Rusia, lo que permite a los usuarios de GALILEO poder disponer también de las señales adicionales de esos sistemas GNSS. Como infraestructura terrestre, el sistema consta de 2 centros de control principales, 2 centros de seguridad del sistema (1 en Madrid, España) más otros 5 centros logísticos o de servicios (1 en Madrid) y 31 estaciones de monitoreo distribuidas por todo el mundo. El sistema geodésico de referencia que utiliza es el europeo ETRS89 y como elipsoide el GRS80-GRS2008. El marco geodésico de referencia es el ETRF (asociado al sistema ETRS89), aunque es totalmente compatible con el ITRF mundial (es posible la transformación de valores entre uno y otro con gran precisión). Su control es civil (Comisión de la Unión Europea y Agencia Espacial Europea ESA), salvo para los casos de crisis de extrema gravedad. Está previsto que su precisión final sea superior a la de los sistemas GPS y GLONASS, de aproximadamente 1 m para el servicio en abierto y cercana a 1 cm para el servicio de pago.

-BeiDou o BDS (BeiDou Navigation Satellite System): Implementado por China, ha sido el último en iniciar su desarrollo. Comenzó a operar en diciembre

de 2018 y está previsto que alcance la operatividad completa a lo largo de 2020. La constelación final constará de 35 satélites, 27 en órbitas elípticas casi circulares a 21.530 km de altitud dispuestos en 3 planos orbitales inclinados 55° y separados 120° , 3 en una órbita geosíncrona a 35.786 km de altitud y 5 en órbita geoestacionaria igualmente a 35.786 km de altitud. Está previsto que permanezcan operativos en todo momento 32 satélites. El período orbital de los situados en órbitas elípticas casi circulares a 21.530 km es de 12h 50min, mientras que el de los situados en órbita geosíncrona y geoestacionaria es de 23h 56min 4s (igual al período de rotación de la Tierra). El sistema posee una estación de control y 50 estaciones de monitoreo. El sistema geodésico de referencia que utiliza es uno propio denominado BDCS, con su elipsoide relacionado CGCS2000, y está ajustado al marco internacional de referencia ITRF. El control del sistema es militar, pero dispone de un canal para uso civil. Su precisión actual se estima en unos 5 m para China y gran parte de Asia, y de unos 10 m para el resto del mundo.

Aparte de estos 4 sistemas de posicionamiento mediante satélites con cobertura global, existen otros 2 con cobertura regional:

-El QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) de Japón, que se encuentra operativo desde noviembre de 2018 y cubre tanto Japón como toda el área de Asia Pacífico-Oceanía

-El IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System), conocido comercialmente como NAVIC (Navigation with Indian Constellation), también operativo desde finales de 2018, que ha sido pues-

to en marcha por la Agencia India del Espacio ISRO para cubrir el sur de Asia y gran parte del Océano Índico.

Sistemas de mejora o "aumentación" de las señales de los satélites GNSS

Todos los sistemas GNSS están expuestos a posibles errores al determinar la ubicación de un punto concreto de la superficie terrestre. Esto puede deberse al desvío en la posición o mal funcionamiento de los instrumentos de los satélites, a las perturbaciones producidas en las frecuencias débiles de radio emitidas por los mismos, a los errores atribuibles a los propios receptores de los usuarios (mal funcionamiento, inadecuada configuración, etc.) o, incluso, al posible bloqueo o modificación de la señal, bien casual o intencionado.

Para mejorar la precisión de la señal de los sistemas GNSS se han desarrollado los denominados **sistemas de aumentación**. Diseñados inicialmente para mejorar la seguridad en la navegación aérea, los SBAS (Sistemas de Aumentación Basados en Satélites) son los sistemas de aumentación utilizados con más frecuencia en los dispositivos portátiles GNSS de usuarios particulares. En los SBAS el proceso de mejora de la señal se realiza por medio de uno a tres satélites situados de forma permanente sobre una área concreta de la superficie terrestre, normalmente en órbitas geoestacionarias. Al tener una cobertura parcial, como mucho a nivel de continente, varios países o grupos de países han implementado distintos sistemas en diferentes zonas del mundo. Cada uno de estos sistemas se basa en una red numerosa de estaciones terrestres que supervisan el paso de los satélites de las diversas constelaciones, generando en conjunto las correspondientes correcciones de mejora de la precisión e integridad de las señales y enviando, mediante antenas de comunicación específicas, las señales corregidas a los satélites geoestacionarios del sistema situados sobre la zona de cobertura. Finalmente, estos son los que emiten las señales corregidas a los receptores finales de los usuarios que tengan soporte de la recepción SBAS, que las captan de forma similar a las señales de los satélites GNSS.

Hay cinco sistemas SBAS totalmente desarrollados: WAAS de EE.UU., EGNOS de la Unión Europea, MSAS de Japón, SDCM de Rusia y GAGAN de la India.

-WAAS (Wide Area Augmentation System): Desarrollado por EE.UU., cubre la totalidad del mismo (incluidos Alaska y Hawaii) y también Puerto Rico, Canadá y México. El sistema, operativo desde final de 2003, consta de 3 satélites geoestacionarios, 2 estaciones de control principales y 38 estaciones de monitorización (28 en EE.UU. 1 en Puerto Rico, 4 en Canadá y 5 en México). Se diseñó y creó para mejorar la señal del Sistema GPS.

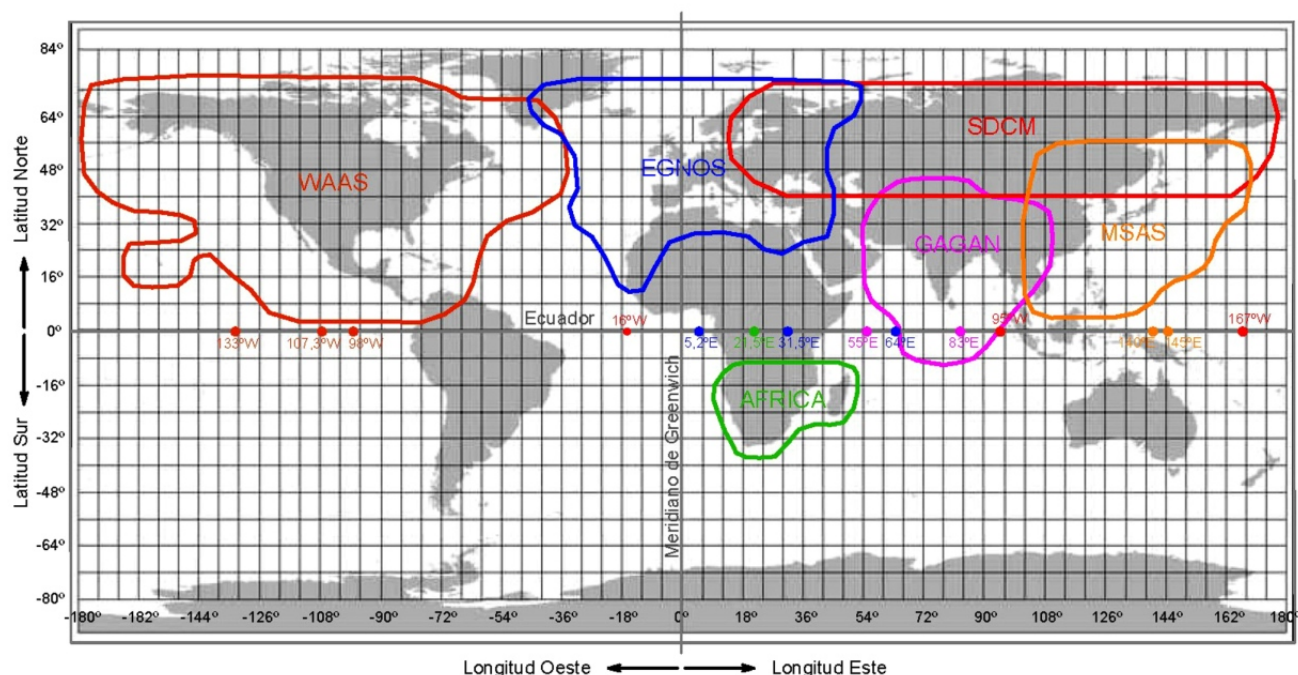


Figura 7. Mapa mundial con las áreas de cobertura de cada uno de los sistemas de aumentación en base a satélites (SBAS) operativos (WAAS, EGNOS, MSAS, SDCM y GAGAN) o en fase de desarrollo (AFRICA).

-EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service): Puesto en marcha por la Unión Europea, cubre todos los países de la Unión Europea más Noruega y Suiza, aunque su cobertura se está ampliando a países del Este de Europa, Próximo Oriente y Norte de África. El sistema está formado por 3 satélites geoestacionarios (2 siempre activos), 2 centros de control principales (1 de ellos en Torrejón, Madrid), 1 Centro de Coordinación, 1 Centro de Servicios (Torrejón, Madrid), 40 estaciones de monitorización de los satélites de todas las constelaciones GNSS (5 de ellas en España, incluidas Baleares y Canarias) y 6 estaciones de navegación con antenas de comunicación (2 por cada satélite), además de una red segura propia de banda ancha para transmisión de los datos entre todas las instalaciones terrestres. Su operatividad provisional se inició en julio de 2005, mientras que la operatividad total del sistema se activó en octubre de 2009. La precisión que se obtiene con este sistema de mejora de las señales de los GNSS (GPS + GLONASS) es, la mayor parte del tiempo, de 1 m o inferior.

-MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System): Cubre Japón, que es el país responsable de su creación, y el área de Asia-Pacífico. La constelación consta de 2 satélites geoestacionarios (también con funciones meteorológicas), 2 estaciones de control principales y 6 estaciones de monitorización (4 en Japón y otras 2 en Hawai y Australia). El sistema, diseñado para mejorar las señales GPS, está operativo desde septiembre de 2007.

-SDCM (System of Differential Correction and Monitoring): Fue desarrollado por Rusia como complemento del

Sistema GLONASS, cubriendo completamente el enorme territorio de la Federación Rusa más algunos países limítrofes. Consta de 3 satélites geoestacionarios más 1 posible adicional, 1 estación de control y una red de 24 estaciones de monitorización (19 en Rusia y 5 en otros países). En la actualidad mejora las señales tanto del sistema propio GLONASS como del sistema norteamericano GPS. Su operatividad completa data de finales de 2018.

-GAGAN (GPS-Aided GEO Augmented Navigation System): Creado por la Agencia India de Investigación Espacial (ISRO) para mejorar la precisión del Sistema GPS, cubre tanto la península de la India como gran parte de la zona sur de Asia y del norte del océano Índico. Consta de 3 satélites geoestacionarios, 2 centros de control del sistema y 18 estaciones terrestres (15 de referencia para monitorización y 3 de comunicaciones con los satélites). Se encuentra operativo desde 2013.

En fase de desarrollo hay otros cinco sistemas SBAS: SNAS de la República Popular China, AFRICA para el continente africano, MALAYSIA para Malasia y el área de su entorno, SACCSA para el Caribe, Centro y Sudamérica, y KASS de Corea del Sur.

Precisión y utilidad de los receptores portátiles GNSS

En la actualidad, el sistema GPS (con o sin complemento del sistema GLONASS), permite obtener, utilizando un equipo portátil de mano o un teléfono móvil de tipo Smartphone, una precisión menor de 5 m captando entre 7 y 9 satélites e, incluso, menor de 2-3 m si son visibles un mayor número de satélites. Pero, ade-

más, si el receptor permite captar las señales de los sistemas de aumentación de tipo SBAS o GBAS, la precisión puede llegar a ser de 1 m o menor.

Al permitir almacenar gran cantidad de información, esta nueva tecnología ha facilitado enormemente las labores de ubicación y registro de datos para todo tipo de estudios geológicos de campo. Esto se ve reforzado por el hecho de que muchos de esos dispositivos permiten cargar en su memoria mapas topográficos detallados o fotografías de satélite con cobertura prácticamente mundial.

Sistema diferencial GNSS (Differential GNSS) o DGNSS con equipos de alta precisión

En el caso de los trabajos de trazado y medición de obras de ingeniería o construcciones, en los que se necesita una precisión centimétrica, ésta se puede alcanzar con el Sistema Diferencial (Differential GNSS o DGNSS), que consiste en realizar medidas de posicionamiento por satélites con receptores de alta precisión utilizando conjuntamente dos o más. El procedimiento consiste en que uno de los receptores debe estar situado de forma fija o estable sobre un punto o estación topográfica, de coordenadas conocidas con gran precisión, situada a no mucha distancia, y que dichos receptores soporten la comunicación directa entre sí por medio de ondas de radio. Esto hace que el dato de posicionamiento inicial tomado por el receptor móvil pueda ser automáticamente corregido y reposicionado con una mayor precisión al tener en cuenta la diferencia observable en la estación base. Si, además, se utiliza una red local de referencia con una serie de puntos o estaciones de coordenadas conoci-

das previamente con mucha precisión, cualquier medida tomada por un receptor GNSS en la zona cubierta por la red o próxima a ella puede alcanzar una resolución incluso de pocos milímetros. Para ello, se utiliza un marco de referencia local o regional muy ajustado para servir de base a nuestras mediciones. En este sentido, en la web del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es), están disponibles ficheros con las coordenadas de alta precisión de un gran número de estaciones de toda España, preparados tanto en formato ASCII como en el formato de las principales casas comerciales de receptores de alta gama (Leica, Topcon, Trimble, Ashtech), para ser cargadas por cualquier usuario que lo necesite con vistas al establecimiento de redes locales o regionales para la realización de trabajos topográficos de precisión.

Interpretación y tipos de mapas topográficos

Pese al impresionante desarrollo de los formatos digitales, el uso de los mapas topográficos y geológicos en papel sigue estando plenamente en vigor, sirviendo como medio de respaldo adicional o complementario a los aparatos electrónicos. Además, en la fase de presentación de resultados siempre habrá que pasar cierto número de datos a un mapa o plano en dos dimensiones, por lo que es imprescindible saber interpretar y manejar los mapas adecuadamente.

Un mapa topográfico de base es una representación en dos dimensiones de una parte de la tridimensional superficie terrestre. Para pasar de tres a dos dimensiones hay que aplicar algún tipo de proyección, por lo que siempre habrá una cierta deformación o distorsión de los datos, aunque en la actualidad sea mínima debido a los sistemas de proyección y de coordenadas utilizados.

Hay dos tipos de formatos digitales de mapas topográficos, y en general de mapas, que son el **formato ráster** y el **formato vectorial**:

- En el formato o modelo lógico **ráster** la superficie u objeto a representar se divide en un conjunto regular de celdillas (o píxeles, a la hora de su visualización), a las que se les asigna un identificador (capa, color, etc.) o un valor de un parámetro o variable determinada (altitud, espesor, %, etc.).

- En el formato o modelo lógico **vectorial** los objetos se representan por medio de puntos, líneas y polígonos, tanto en 2 como en 3 dimensiones.

Cada uno de estos dos formatos presenta sus ventajas e inconvenientes, dependiendo del uso específico que se le vaya a dar. Los mapas del IGN a escala 1:50.000 y 1:25.000 están disponibles para descarga de los usuarios en ambos formatos en su página web <https://www.ign.es/>.

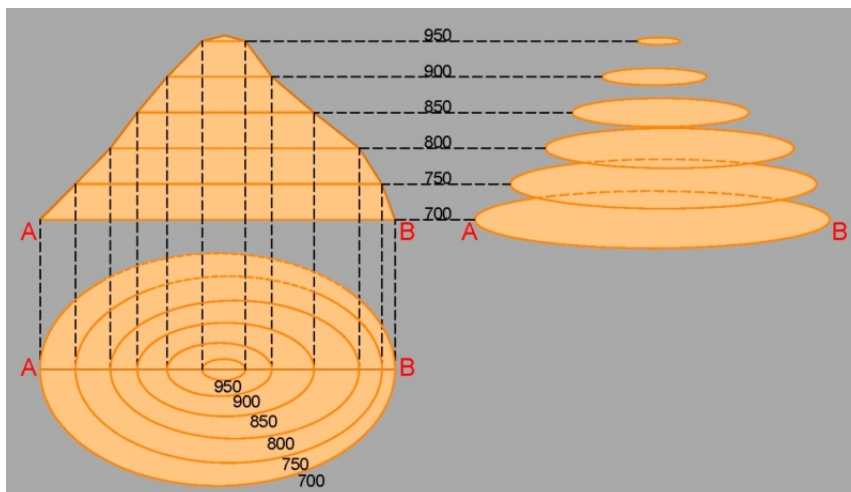


Figura 9. Esquema con el concepto y disposición de las curvas de nivel.

Además de la información incluida en los mapas topográficos fácilmente entendible y representada mediante signos convencionales (ríos y arroyos, lagos y lagunas, embalses, carreteras y caminos, vías férreas, límites administrativos y medioambientales, edificios y construcciones, minas y canteras, escombreras y vertederos, toda clase de estructuras, toponimia diversa, etc.), en ellos aparece otra información que precisa de un cierto conocimiento o explicación previa, como la escala numérica y la escala gráfica del mapa, el trazado y configuración de las curvas de nivel y de sus etiquetas de cota (incluida su equidistancia), puntos aislados de altitud correspondientes a rasgos topográficos destacados (picos y altos, collados, etc.), ... Por último, en los márgenes de la hoja y en la parte inferior de la misma, está la información de tipo técnico, como el tipo de **elipsoide** y **datum**, referencia de longitudes y de latitudes, tipo de proyección aplicada, red de coordenadas representadas en la hoja, huso y factor de escala, declinación magnética, convergencia de la cuadrícula y tipo de vértices geodésicos.

Escala numérica y escala gráfica

La **escala** es la relación existente entre una distancia o longitud determinada medida sobre un mapa y su equivalente en la realidad. Si se refleja en el mapa mediante dos números separados por un signo ":" o "/" (cociente o relación), se trata de la denominada **escala numérica**. El primer número es siempre un 1 y el segundo la distancia o longitud equivalente en la realidad. Es, por tanto, adimensional. Por ej.: una escala de 1:50.000 ó 1/50.000 significa que una unidad (cm, m, ...) en el mapa corresponde a 50.000 unidades (cm, m, ...) en el terreno real, o sea, 1 cm equivaldría a 500 m. Para un idéntico tamaño de mapa, cuanto mayor es la escala (mayor valor de cociente) menor será el área real del terreno que abarca y, al contrario, cuanto menor es la escala (menor valor

de cociente), mayor será el área del terreno real que representa.

Aunque se suele hablar de mapas en general, suelen utilizarse nombres diferentes para las representaciones cartográficas en función de la escala. Así hablamos de:

- **Atlas** cuando la escala es muy pequeña, normalmente inferior a 1/1.000.000, mostrando una cartografía correspondiente a grandes extensiones de terreno como países o continentes.

- **Mapas** cuando la escala está comprendida entre 1/10.000 y 1/1.000.000. En este caso, como la extensión representada sigue siendo grande, suele dividirse en partes de forma rectangular a las que se denomina hojas.

- **Planos o cartografías** si la escala de representación es grande, superior a 1/10.000. Son representaciones cartográficas para trabajos de detalle en áreas relativamente poco extensas.

El otro tipo de escala que aparece en los mapas es la denominada **escala gráfica**. Se trata de una representación gráfica consistente en una línea dividida en un número variable de segmentos, cada uno con un dígito anexo de valor entero (en m o km), y que coinciden con las distancias o longitudes representadas en el mapa. Así, midiendo una distancia o longitud en el mapa, se puede saber su distancia en la realidad al trasladar dicha medida sobre la escala o regla gráfica. Esta escala es fundamental a la hora de trabajar, ya que permite la utilización en el campo de reducciones o ampliaciones de los mapas sin perder su validez o reducir su exactitud.



Figura 8. Representación numérica y gráfica de la escala, imprescindible en cualquier mapa.

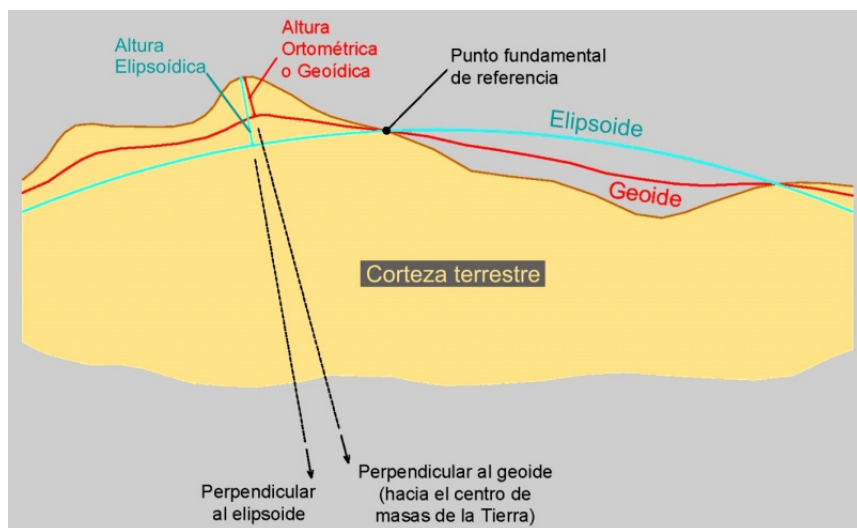


Figura 10. Esquema con la disposición del geode, elipsoide y punto fundamental de referencia respecto a los continentes y océanos, así como la definición de las altitudes ortométricas (o geodésicas) y elipsoidicas.

Curvas de nivel y puntos aislados de altitud

Las **curvas de nivel** son líneas que representan el relieve del terreno. Se definen como el lugar geométrico de los puntos de este que tienen igual altitud, y se obtienen al cortar dicho terreno con planos horizontales separados por una distancia uniforme. Esta equidistancia varía en función de la escala del mapa, siendo habitualmente de 2 a 5 m para una escala de 1/5.000, de 5 m para una escala de 1/10.000, de 10 m para una escala de 1/25.000, de 20 m para una escala de 1/50.000, de 50 m para una escala de 1/100.000, de 100 m para una escala de 1/200.000 y 1/250.000, de 200 m para una escala de 1/400.000 y de 500 m para una escala de 1/800.000.

Lo normal es representar dos tipos de curvas de nivel:

- Las **curvas principales**, maestras o directoras, que se representan con un trazo continuo grueso y con un número, a modo de etiqueta, que muestra el valor de la altitud. Dicha altitud está referida a un punto determinado de comparación de valor conocido y que, en España, es el nivel medio del mar en Alicante, medido sobre el mareógrafo allí instalado.

- Las **curvas secundarias** o auxiliares, que se representan con un trazo continuo más fino y sin número que refleje su altitud. Se suelen disponer cuatro entre cada dos curvas principales o maestras.

Adicionalmente, las depresiones o zonas con relieve negativo se suelen representar con un trazo discontinuo, distinguiendo también entre curvas principales o maestras y secundarias o auxiliares.

En ocasiones se aplica un efecto de sombreado adicional para resaltar aún más el relieve. Cuando se trata de mapas a pequeña escala que representan áreas grandes, se suelen utilizar a menudo franjas de colores para representar las altitudes, en sustitución de las curvas de nivel.

Las curvas de nivel son siempre cerradas (si no lo hacen en una hoja topográfica lo harán en la hoja vecina), nunca se cortan

entre sí (a no ser que se trate de laderas o cortados invertidos, que no suelen ser habituales ni representables por su dimensión), su separación dependerá de la inclinación del terreno (más juntas en caso de mayor pendiente y más separadas en caso de menor pendiente), dibujarán una forma de V para representar valles (tanto más cerrada cuanto más estrechos sean) y tendrán contornos cerrados para representar picos o altos individualizados.

Los **puntos aislados de altitud** representan puntos significativos del terreno (como cimas de picos o altos, collados, resaltes o fondos de depresiones) y se ubican en el mapa con una marca en forma de punto y un valor numérico adyacente con la altitud o cota. Estas altitudes, en España, al igual que en el caso de las curvas de nivel, están referidas al nivel medio del mar en Alicante.

Las curvas de nivel y puntos aislados de altitud constituyen el mejor sistema de

	SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERENCIA			
	Datum de Madrid 1870	European Datum 1950 (ED50)	World Geodetic System 1984 (WGS84)	European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)
Fecha de Adopción	1870	1950 (varios países de Europa)	1987	2007 (España)
Válido hasta	1970	2007-2015 (España)	Actualidad	Actualidad
Ámbito aplicación	España	Europa	Mundial	Europa
Elipsoide de Referencia	Struve 1860	Internacional 1924 (Hayford 1909)	WGS84	GRS80
Punto fundamental de referencia	Observatorio de El Retiro (Madrid)	Observatorio de Postdam (Alemania)	-----	-----
Marco Geodésico de referencia	Red Clásica Pasiva Geodésica de España	Redes Clásicas Pasivas Geodésicas En España completada y redefinida mediante Vértices RPO y ROI	WGS84 (Red GPS) ITRF (Red mundial GNSS, radioastronómica, telemetría láser y doppler)	ETRF89 (red GPS europea en origen) EUREF PN + EVRF (Red GNSS EUREF + Marco vertical europeo en la actualidad)
Semieje mayor o Ecuatorial (a)	6.378.298m	6.378.388m	6.378.137,0m	6.378.137,0m
Semieje menor o Polar (b)	6.357.018m	6.356.911,946m	6.356.752,3142m	6.356.752,31414m
Achatamiento o Apianamiento 1/f (f=a/(a-b))	1/299,732	1/297,000	1/298,257223563	1/298,257222101
Meridiano de referencia	Madrid (-3° 41' 15" W respecto al Meridiano de Greenwich)	Greenwich (Este de Londres, Reino Unido)	Meridiano de Referencia IERS (IRM) muy cercano y paralelo al Meridiano de Greenwich (5,3" ó 102m al Este)	Meridiano de Referencia IERS (IRM) muy cercano y paralelo al Meridiano de Greenwich (5,3" ó 102m al Este)
Tipo de Sistema Geodésico	Homogéneo (observaciones de topografía clásica a partir de vértices Geodésicos con medición de bases y ángulos)	Heterogéneo (observaciones de topografía clásica junto a observaciones de GNSS)	Homogéneo (observaciones de GNSS en red mundial de estaciones que definen el marco ITRF con complemento de estaciones radioastronómicas VLBI, estaciones de telemetría láser SLR y LLR, y estaciones de medición doppler DORIS)	Homogéneo (observaciones de GNSS en red europea de estaciones EUREF PN que definen el marco ETRF) En España Red REGENTE pasiva con observaciones GNSS y densificación + Estaciones EUREF PN
Tipo de coordenadas	Geodésicas angulares (Longitud λ y Latitud φ)	Geodésicas angulares (Longitud λ y Latitud φ) transformables a Ortométricas UTM (X, Y)	Geocéntricas (X,Y,Z) transformables a Geodésicas angulares (Longitud λ y Latitud φ) y Ortométricas UTM (X, Y)	Geocéntricas (X,Y,Z) transformables a Geodésicas angulares (Longitud λ y Latitud φ) y Ortométricas UTM (X, Y)
Referencia de Altitudes	Geoide (Ortométrico) Nivel medio del mar en Alicante	Geoide o Elipsoide (Ortométrico o Elipsoidico) En España Geoide (Nivel medio del mar en Alicante)	Geoide o Elipsoide (Ortométrico o Elipsoidico) En España Geoide (Nivel medio del mar en Alicante)	Geoide o Elipsoide (Ortométrico o Elipsoidico) En España Geoide (Nivel medio del mar en Alicante)
Observaciones	Sistema Geodésico oficial en España desde 1870 hasta 1970	Sistema Geodésico oficial en Europa en la 2ª mitad del siglo XX En España desde 1970 hasta 2007 con período transitorio hasta 2015	Sistema Geodésico mundial de referencia desde 1987 Sistema Geodésico por defecto en receptores GNSS portátiles de mano y en vehículos	Sistema Geodésico oficial actual en Europa (UE) Sistema Geodésico oficial en España desde 2007 con período transitorio hasta 2015
	ITRF=Marco de referencia Terrestre Internacional definido y actualizado por el IERS IERS= Servicio Internacional de la Rotación y del Sistema de Referencia Terrestre ETRF89=Marco de Referencia Terrestre Europeo de 1989 definido por EUREF y actualizado mediante la Red europea EUREF PN de Estaciones permanentes EUREF=Subcomisión de la IAG para el Marco de Referencia Regional Europeo IAG=Asociación Internacional de Geodesia RPO y ROI=Vértices geodésicos clásicos de las Redes Españolas de Primer Orden y de Orden Inferior REGENTE= Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales UTM=Coordenadas ortométricas correspondientes a la proyección Universal Transversa de Mercator			

Figura 11. Cuadro resumen con las principales características de los sistemas geodésicos de referencia actualmente en vigor de ámbito mundial (WGS84) y ámbito europeo (ETRS89), del sistema geodésico anteriormente utilizado en Europa (ED50) y del histórico sistema geodésico o datum geodésico de ámbito exclusivamente español (Datum de Madrid).

REDES Y MARCOS GEODÉSICOS EN ESPAÑA				
	Red Geodésica Clásica RPO y ROI	Red Geodésica Nacional por Técnicas espaciales REGENTE	Red de Nivelación de Alta Precisión REDNAP	Red Nacional de Estaciones de Referencia GNSS ERGNSS
Organismo responsable	IGN	IGN	IGN	IGN (principal)
Tipo de Estaciones o Vértices	Vértices de obra (hormigón)	Vértices de obra (hormigón)	Clavos topográficos metálicos	Estaciones permanentes con antenas y receptores de señales GNSS y SBAS
Nº de Estaciones o Vértices	11.624 vértices 680 de Primer Orden RPO 10.944 de Orden Inferior ROI	1.029 vértices (de los antiguos RPO) Levantamiento por GPS del resto de vértices (RPO y ROI)	Aprox. 17.100km de líneas de nivelación (inicial) Aprox. 3.200km de líneas de nivelación (ampliación) 136 Nodos y 14 falsos Nodos	104 estaciones 48 sólo ERGNSS 25 de la Red EUREF PN 2 de la Red IGS, 52 en ITRF2014
Densidad de Estaciones o Vértices		1 Vértice por Hoja Topográfica 1:50.000 aprox. cada 300km ² con distancia <20km	1 Clavo por cada km aprox.	
Fecha de inicio y finalización de instalación	1982 a 1992	1994 a 2001	1999 a 2008 (inicial) 2008 a 2009 (ampliación)	1998-Actual
Tipo de Red Geodésica	Pasiva	Pasiva	Pasiva	Activa
Tipo de mediciones	Observaciones de topografía clásica con medición de bases y ángulos	Posicionamiento puntual mediante satélites GPS con densificación	Levantamiento por GPS y apoyo en Red REGENTE	Posicionamiento continuo por GNSS y SBAS
Precisión		<1cm en posición (IBERIA95, BALEAR98 y REGCAN95) <5cm en posición (resto de Vértices)	Centimétrica, con desviaciones máximas de 8-9cm en los extremos peninsulares	<1cm en posición Y <1cm en velocidad de movimiento
Clasificación de la Red según IAG		Clase B (IBERIA95, BALEAR98 y REGCAN95) Clase C (resto de Vértices)		Clase A
Vigencia	1992-2007	2001-Actual	2009-Actual	1998-Actual
Sistema Geodésico asociado	ED50	ETRS89	ETRS89	ETRS89
Observaciones	Red antigua clásica española vigente hasta el establecimiento de REGENTE	Incluye las Campañas iniciales IBERIA95, REGCAN95 y BALEAR98	Ajuste final en base a la Red española del Geoides global EGM2008 con precisión de 3,8cm	Integrante de la Red de Estaciones Permanentes EUREF PN Integración en IERS-ITRF e IGS
Estaciones o Vértices en Provincia de León		318 vértices (35 REGENTE y 283 ROI)	5 nodos 23 líneas nivelación aprox. 875 clavos	2 estaciones (León y Villablino)
Estaciones o Vértices en Hojas Topográficas de Villablino (nº101) y Barrios de Luna (nº102)		Hoja 101 → 7 vértices (1 REGENTE y 6 ROI) Hoja 102 → 8 vértices (1 REGENTE y 7 ROI)	Hoja 101 → 1 nodo, 3 líneas de nivelación, 60 clavos Hoja 102 → 1 línea de nivelación, 56 clavos	Hoja 101 → 1 estación (Villablino)

Figura 12. Cuadro resumen de las redes y marcos geodésicos en España.

representación del relieve, ya que permiten tener fácilmente una rápida y efectiva visualización de la morfología del terreno, obtener perfiles a escala en cualquier orientación y calcular de forma rápida los volúmenes de cualquier forma del relieve, tanto positiva como negativa.

Elipsoide, geoide y datum o sistema geodésico. Sistemas y marcos o redes geodésicas

Concepto de geoide, elipsoide y datum o sistema geodésico

El **geoide** se define como la hipotética superficie de la Tierra que uniría los puntos de igual gravedad prescindiendo de la existencia de continentes y considerando el nivel del mar en equilibrio, sin influencia de vientos, mareas, presión atmosférica, etc. No puede definirse mediante una fórmula o expresión matemática debido a que no es una superficie regular ni simétrica, ya que la gravedad presenta variaciones de unos lugares a otros debido a las diferencias de composición mineral en el interior terrestre y a la presencia de la gran masa de agua de los océanos.

Como solución se considera el **elipsoide** o **esferoide**, que se define como una superficie tridimensional hipotética, regular y definible mediante una fórmula matemática (puede generarse por revolución de una elipse alrededor de su punto central), que se aproxime lo más posible a la superficie del geoide y que sea tangente al mismo, es decir que coincidan en un punto de base fundamental, a partir del cual, podamos medir la desviación respecto a aquel. La forma real de la Tierra se asemeja en gran medida a esta figura geométrica tridimensional, ya que es una esfera algo achatada por los polos, siendo su radio ecuatorial de aproximadamente 6.378 km y el polar de unos 6.357 km, con una diferencia de unos 21 km. Su aplastamiento es, por tanto, de 42 km, es decir, un valor realmente mínimo del 0.329%.

El elipsoide se define por los valores de su **semieje mayor o ecuatorial (a)**, su **semieje menor o polar (b)**, su **achatación o aplanamiento (f)** (relación entre a y b, $f=a/(a-b)$) y por su **punto fundamental** de coincidencia o anclaje con el geoide, definido por sus coordenadas

geográficas angulares o geodésicas de longitud (λ) y de latitud (Φ), que es el más natural para representar posiciones sobre un elipsoide. Pero, además de los parámetros anteriores, para poder utilizar de forma práctica un elipsoide, es necesario establecer un **sistema de referencia para el origen de las coordenadas**, tanto en **longitud** como en **latitud**, y la dirección que define el Norte. Para medir las latitudes se usa de referencia el Ecuador y para medir las longitudes se suele tomar bien el meridiano de Greenwich o, más recientemente, el meridiano de referencia IERS o IRM (muy próximo al de Greenwich, a unos 102 m al Este y que pasa por el centro de masas de la Tierra).

Las altitudes en todos los trabajos topográficos y cartográficos suelen referirse respecto al geoide (alturas ortométricas o geoidicas), o respecto al nivel del mar (en España medido en el puerto de Alicante). A todo este conjunto de parámetros, que sirven para definir completamente un elipsoide y establecer la relación de este con un sistema de coordenadas a aplicar sobre él, se le denomina **datum geodésico** o **sistema geodésico**.

A medida que los sistemas de medición han ido mejorando en exactitud, numerosos países fueron definiendo diferentes datums o sistemas geodésicos de referencia para que se adaptasen lo mejor posible al geoide en su territorio, haciendo tediosa y compleja la transformación entre ellos para la realización de cartografías de conjunto. Para poner fin a este problema, a partir de los años 50 del pasado siglo XX, comenzaron a definirse datums o sistemas geodésicos de uso común que se adaptasen bien a grandes extensiones de territorios, hasta llegar a los sistemas actuales de uso continental o global.

En la actualidad hay un sistema geodésico de ámbito mundial denominado WGS84 (*World Geodetic System 1984*) y otro oficial en toda Europa (Unión Europea y países del entorno) denominado ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*). Sus principales características junto con las del anterior Sistema Geodésico Europeo en vigor ED50 (*European Datum 1950*) y las del antiguo Sistema Geodésico Español denominado Datum de Madrid, pueden verse en la Figura 11. En el caso de los sistemas geodésicos actuales, como el WGS84 y el ETRS89, el punto fundamental o de referencia ya no se define en superficie, sino que al tratarse de sistemas geocéntricos con coordenadas X, Y, Z, su punto de referencia (origen) está en el interior terrestre, concretamente en su centro de masa. Este se puede definir con precisión centimétrica a partir del modelo de geoide establecido en superficie a partir de una gran cantidad de mediciones de los parámetros gravimétricos. El

último modelo establecido de geoide con carácter mundial es el denominado EGM2008.

Transformación de coordenadas entre sistemas geodésicos

Las coordenadas de un mismo punto del terreno tienen valores diferentes según el datum o sistema de referencia. En el caso del ETRS89 respecto al ED50 las diferencias son aproximadamente de unos 120 m de desvío en X hacia el Este y de unos 210 m de desvío en Y hacia el Norte. La transformación exacta de los valores de las coordenadas de uno a otro sistema geodésico con precisión es de una cierta complejidad matemática, ya que implica no sólo traslación sino también rotación y aplicar un factor de escala. Afortunadamente, los propios dispositivos de mano GNSS permiten cambiar los valores de coordenadas de uno a otro sistema con una adecuada precisión a nivel de usuario. Igualmente, se puede realizar la transformación utilizando programas específicos de uso libre existentes en internet, a modo de calculadoras geodésicas, bien en línea o bien en un ordenador tras su descarga. En este sentido cabe mencionar el PAG o Programa de Aplicaciones Geodésicas, del Instituto Geográfico Nacional, que está disponible en su página web, o el servicio en línea de transformación de coordenadas del IGN (<https://www.ign.es/wcts-app/>).

Debido a las diferencias de coordenadas entre los sistemas geodésicos de referencia ED50 y ETRS89, los mapas u hojas topográficas elaboradas por el IGN en el nuevo Sistema ETRS89 tienen vértices delimitantes diferentes a los de los anteriores mapas u hojas elaboradas con el Sistema ED50.

El sistema geodésico ETRS89 fue diseñado para ser compatible con el sistema mundial de referencia WGS84 ya que, aunque no sean exactamente idénticos, sí lo son, en la práctica, a nivel de usuario.

Marcos geodésicos de referencia en Europa y resto del mundo

Los marcos geodésicos de referencia constituyen la materialización de los sistemas geodésicos de referencia, lo cual significa definir las técnicas aplicadas en la medición, establecer los métodos de cálculo y levantar las coordenadas de los puntos. Un Marco Geodésico Terrestre (TRF) quedará definido por un conjunto de estaciones o puntos de medida, bien con extensión local, regional, nacional, continental o mundial, y que tienen unas coordenadas bien determinadas.

En la actualidad hay un gran número de estaciones de medida distribuidas por todo el mundo que se utilizan para el establecimiento de varios marcos de referencia o redes geodésicas de referencia. Unas son clásicas, pasivas y de obra, heredadas de las redes geodésicas antiguas

(vértices o hitos topográficos de obra), pero que se levantan periódicamente por equipos de posicionamiento GNSS; otras son activas, con equipos instalados de forma permanente (antenas y receptores de señales de las constelaciones de satélites, estaciones astronómicas de radiotelescopios y láseres, etc.), que registran de forma diaria o frecuente la posición de dichas estaciones. Los marcos geodésicos principales son:

-Marco Geodésico de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), que ha sustituido en la práctica al marco original asociado al Sistema Geodésico WGS84. Está definido y soportado por el Servicio Internacional de la Rotación y del Sistema de Referencia Terrestre (IERS), organismo creado conjuntamente por la Unión Astronómica Internacional (IAU) y la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG). La última actualización data de 2014 (ITRF2014), siendo establecida con los datos proporcionados por 1499 estaciones correspondientes a 975 lugares de todo el mundo.

-Marco Geodésico de Referencia Terrestre Europeo (ETRF89), que es el marco del sistema geodésico ETRS89 y fue establecido en 1989 con los datos proporcionados por 129 estaciones distribuidas por toda Europa. Es un marco geodésico fijo anclado a la posición en 1989 de la parte europea de la placa tectónica euroasiática, aunque sigue actualizándose cada varios años a partir de los datos de las estaciones europeas del ITRF. La última actualización data de 2014 (ETRF2014).

-Red GNSS EUREF de Estaciones Permanentes (EUREF PN o EPN) y Marco de Referencia Vertical Europeo (EVRF). Es, a nivel práctico, la evolución del marco ETRF, sustituyéndolo en gran medida como marco de referencia geodésico europeo. La red EUREF PN está constituida por 335 estaciones, 40 de las cuáles se encuentran situadas en España, que realizan la medición continua por GNSS y SBAS de su posición; y el marco de referencia vertical EVRF consta de 13 puntos de referencia para determinación y estandarización de la medición de altitudes.

-Servicio Internacional GNSS de Estaciones Permanentes (IGS). Servicio internacional independiente creado en 1994, que está soportado y mantenido por más de 200 Agencias, Universidades e Institutos de Investigación de más de 100 países. En la actualidad forman parte de este servicio 508 estaciones GNSS, cuyos datos se incluyen también en el marco ITRF.

Marcos o redes geodésicas de referencia en España

En España existen varias redes o marcos geodésicos de referencia, desde las clásicas más antiguas y pasivas hasta las más recientes activas con equipos permanentes de captación de señales de los satélites de las constelaciones GNSS y de los de tipo SBAS.

Como complemento a esta Red Nacional de Estaciones Permanentes, casi todas las Comunidades Autónomas han implementado sus propias redes de estaciones permanentes. El acceso a sus datos

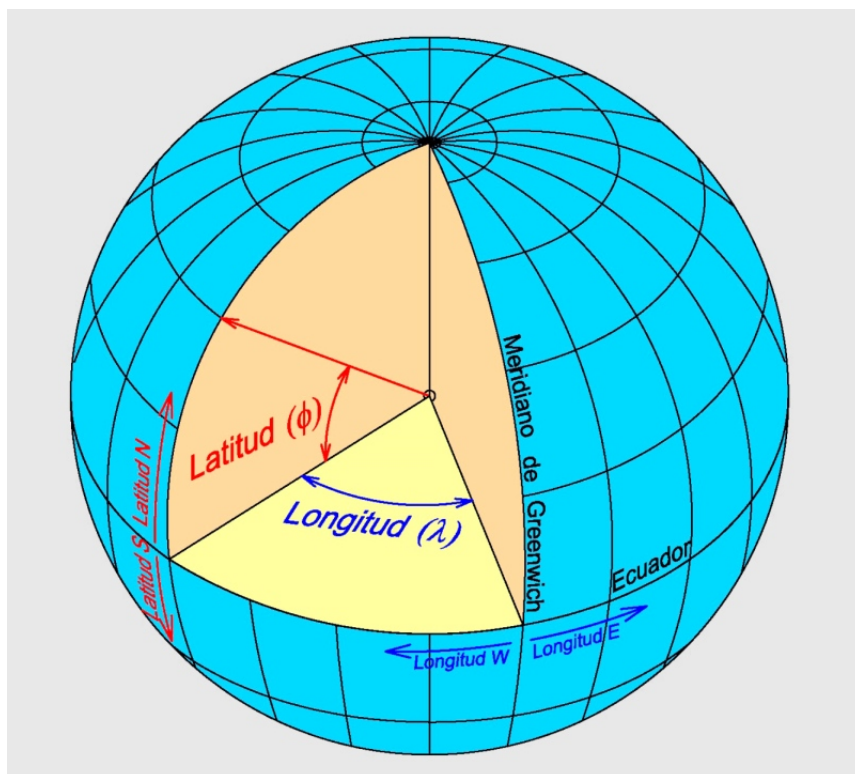


Figura 13. Esquema con la disposición de las coordenadas angulares geodésicas o geográficas (longitudes y latitudes).

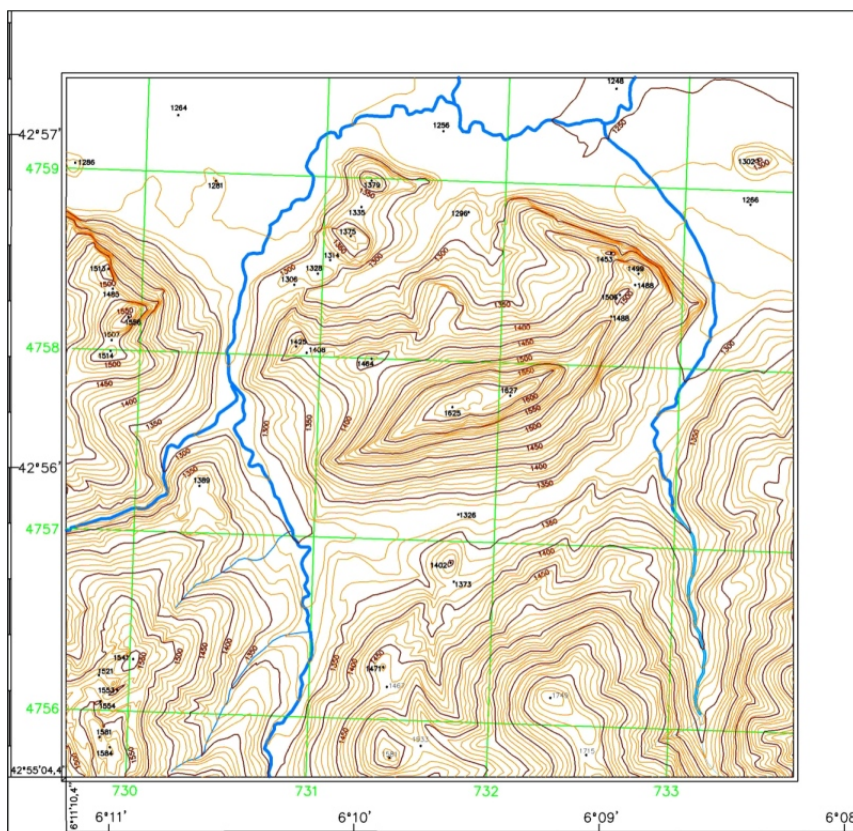


Figura 14. Porción de mapa topográfico con indicación de las coordenadas geodésicas o geográficas y las coordenadas UTM.

puede hacerse desde la página web del IGN mencionada anteriormente. La de Castilla y León se denomina ITACYL y consta de 49 Estaciones, algunas compartidas con la red nacional; su dirección web es <http://gnss.itacyl.es>.

El acceso a todos los datos concernientes a las redes españolas existentes, incluida la descarga de ficheros de datos, puede hacerse a través del servidor del Área de Geodesia de la página web del Instituto Geográfico Nacional <http://www.ign.es>.

Coordenadas geodésicas o geográficas

Los sistemas geodésicos de referencia y su materialización física sobre la superficie terrestre, los marcos geodésicos, nos permiten definir una serie de coordenadas geodésicas angulares en forma de longitud y latitud (las coordenadas geográficas), y así marcar la posición de cualquier punto sobre dicha superficie, representada por medio de un elipsoide.

La **longitud** es la distancia angular que hay entre el meridiano que pasa por un punto determinado y el meridiano de Greenwich; varía entre 0° y 180° hacia el Oeste o hacia el Este (longitud W o longitud E).

La **latitud** es la distancia angular que existe entre el paralelo que pasa por un punto determinado y el Ecuador; su valor varía entre 0° y 90° hacia el Norte o hacia el Sur (latitud N o latitud S).

La notación es en formato sexagesimal con grados, minutos y segundos, pudiendo añadir décimas, centésimas y milésimas de segundo si fuese necesaria una mayor precisión.

Las coordenadas geográficas varían según el datum o sistema geodésico de referencia, por lo que es necesario mencionarlo también junto a los valores de las coordenadas.

En los márgenes del mapa de las series MTN50 y MTN25, a escala 1:50.000 y 1:25.000, del Mapa Topográfico Nacional, se indica la división en grados y minutos, tanto en el eje X de longitudes como en el eje Y de latitudes, mediante una marca y un valor numérico más grande para los grados, uno menor para los minutos, y una subdivisión de 10 en 10 para los segundos sólo de tipo gráfico. Además, en las esquinas de cada hoja de estos mapas, se muestran sus coordenadas con una precisión de grados ($^\circ$), minutos ($'$), segundos ($''$) y décimas de segundo ($'''$).

En cada meridiano la distancia por cada grado permanece aproximadamente constante (en realidad varía mínimamente debido al achatamiento en los polos), equivaliendo a unos 111,13 km si se toma para el cálculo un valor del radio medio terrestre de 6.371 km. En los paralelos la distancia por cada grado varía desde un valor máximo en el Ecuador de unos 111,33 km hasta un valor de 0 en los polos.

Proyección y coordenadas UTM. Husos, zonas y factor de escala

Como hemos visto anteriormente, el principal problema existente desde que comenzaron a utilizarse las coordenadas geográficas es el de pasar de un sistema de medición angular tridimensional (posición sobre una superficie elipsoidal curvada) a una representación en dos dimensiones (como los mapas y planos utilizados habitualmente). Este proceso de transformación de tres a dos dimensiones se denomina **proyección**. Todas las proyecciones originan algo de deformación, siendo tres las magnitudes fundamentales que pueden verse afectadas: las superficies, los ángulos y las distancias o longitudes. Sólo se podrá conservar una de las magnitudes anteriores, y se intentará reducir al máximo la deformación en las otras dos; y el problema tendrá más importancia a medida que se quieran representar áreas cada vez mayores.

La proyección que se aplica de forma más generalizada en la actualidad es la denominada Proyección Universal Transversa de Mercator o UTM, variante de la ideada por el geógrafo G. Mercator a mediados del siglo XVI, e ideada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. en la década de 1940. En la UTM, la proyección perpendicular de cada punto del elipsoide, que representa la superficie terrestre, se realiza sobre la superficie interna de un cilindro que se sitúa transversal, con su eje paralelo al plano ecuatorial de dicho elipsoide. Para que las deformaciones sean mínimas y no aumenten progresivamente hacia los extremos E y W, no se proyecta el elipsoide entero de una vez, sino que se hace de forma parcial un determinado número de veces (proyección compuesta). Para ello se gira progresivamente la superficie cilíndrica a intervalos de 6° hasta cubrir la totalidad de la superficie elipsoidal. De esta forma, se divide la superficie terrestre elipsoidal en 60 franjas, a modo de gajos de una naranja, de 6° de anchura o longitud cada una, que reciben el nombre de **husos** y que se numeran del 1 al 60 comenzando desde el antimeridiano o meridiano opuesto al de Greenwich y en dirección Este. Los paralelos en esta proyección aparecen como líneas curvas convexas respecto al Ecuador y de trazado simétrico con relación al meridiano central del huso. Se consigue con ello que las distorsiones dentro de cada huso sean pequeñas, pero, para reducirlas aún más, en vez de ser el cilindro tangente al elipsoide, se ha hecho secante a cada huso, con lo que se definen dos planos de corte verticales, uno a cada lado del meridiano central de cada huso y paralelos a este, a una distancia que varía algo según la latitud.

La deformación que afecta a todos los mapas, al ser consecuencia de la aplica-

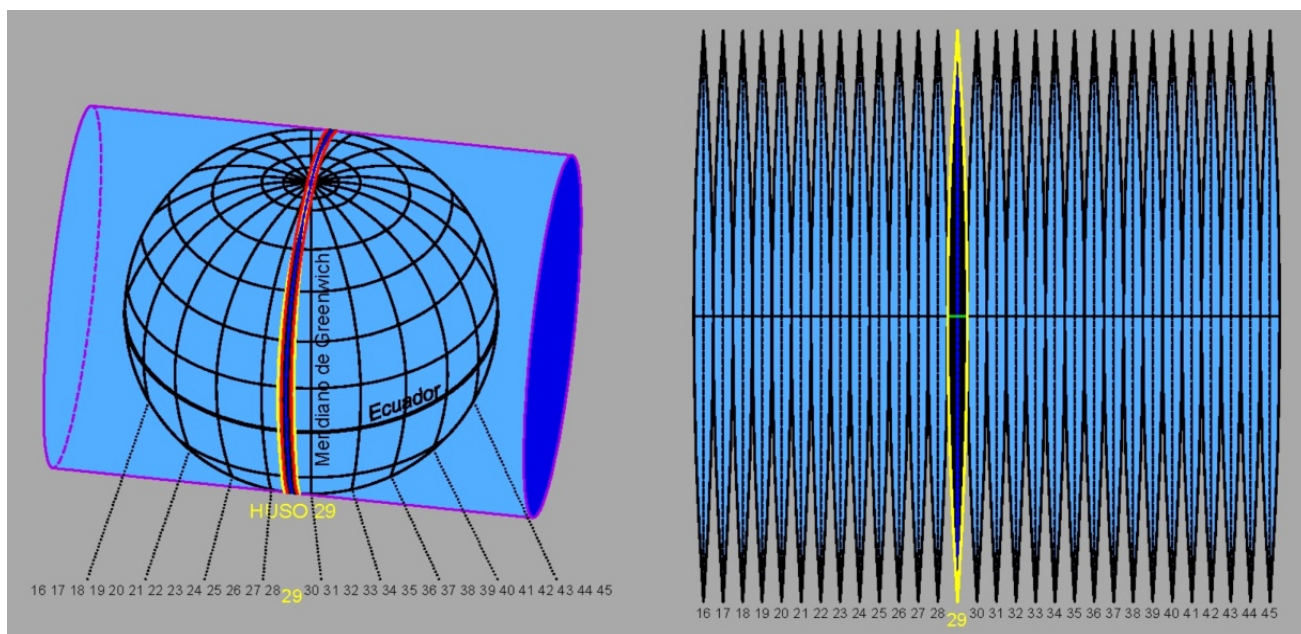


Figura 15. Esquema del elipsoide terrestre y su proyección sobre un cilindro transversal secante, base del sistema de coordenadas UTM. En la imagen de la derecha se representan a escala la mitad de los husos (30 de los 60 existentes).

ción de una proyección, se suele indicar respecto al centro de estos mediante un valor denominado **factor de escala (K)**, que se procura sea lo más próximo a 1, o sea, sin ninguna deformación. A lo largo de las dos líneas de superficie coincidentes con los planos de corte, definidas en cada huso, no hay deformación (factor de escala $K = 1$); hacia el interior entre ambos planos, el factor de escala es ligeramente inferior a 1 ($K = 0,9996$ en el meridiano central) y, hacia el exterior de cada uno de los dos planos, el factor de escala es ligeramente superior a 1 ($K = 1,000979$ en ambos extremos del huso). Con este sistema de hacer los cilindros de la proyección secantes al elipsoide se consigue que la distorsión lineal esté comprendida entre un mínimo de $-0,04\%$ y un máximo de $+0,0979\%$.

Debido a su forma, la anchura de cada uno de los **husos** varía entre un máximo en el Ecuador de unos 667,958 km, hasta un mínimo de 0 km en los Polos. Sin embargo, la proyección UTM sólo se aplica hasta los paralelos 84°N y 80°S debido a las grandes distorsiones que se producen en las latitudes más cercanas a los Polos. La diferencia de 4° entre el extremo N y S se debe a la conveniencia de incluir todas las tierras emergidas de los extremos septentrionales de América y Eurasia, algo que no es necesario en el hemisferio Sur, ya que una parte de la Antártida queda excluida de todas formas. Para la representación cartográfica de las latitudes mayores de 80° en el hemisferio Sur y mayores de 84° en el hemisferio Norte se utiliza la Proyección Estereográfica Polar UPS (*Universal Polar Stereographic*).

Para completar la rejilla UTM, los **husos** se dividen en 20 **zonas** o **bandas** siguiendo la dirección de los paralelos, 10 en el hemisferio Norte y 10 en el hemisferio

Sur, cada una de las cuales tiene un ancho de 8° excepto la situada más al Norte (la denominada X), que tiene 12° de anchura, ya que alcanza los 84° de latitud

y no los 80° . La notación que se les aplica a las zonas es mediante letras mayúsculas:

-C, D, E, F, G, H, J, K, L y M de Sur a Norte

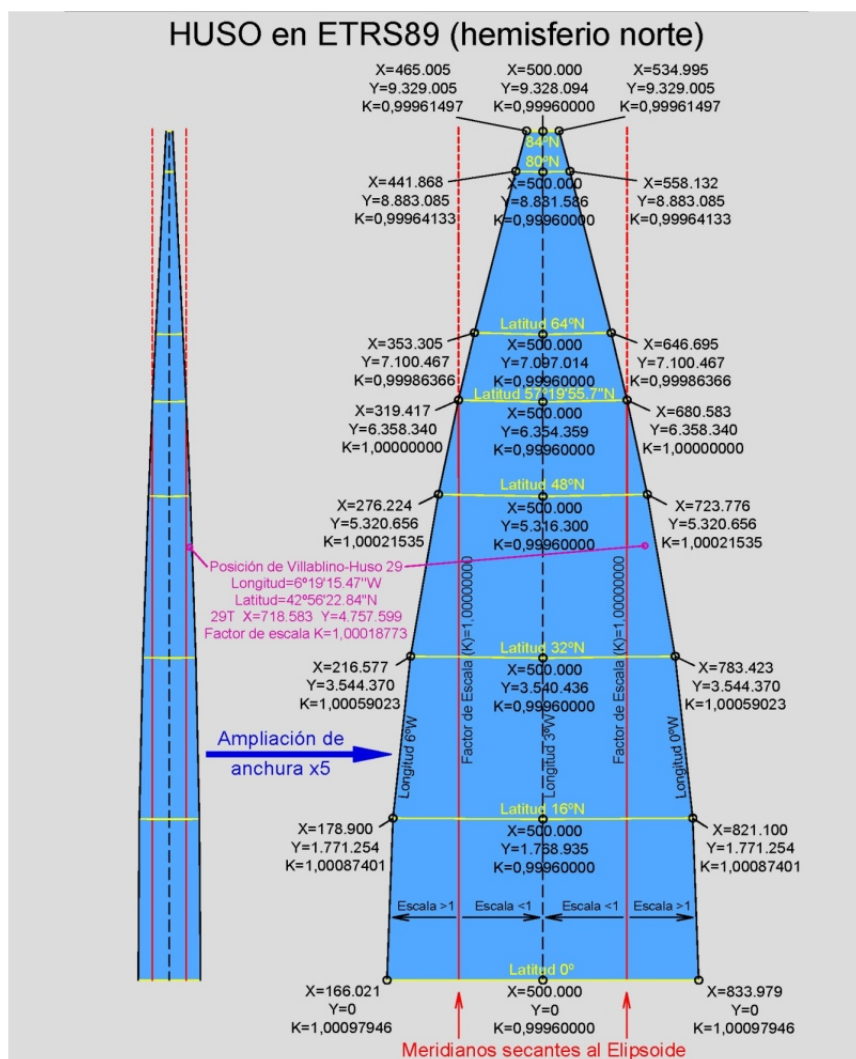


Figura 16. Esquema tipo del hemisferio norte de un Huso, con representación de su forma, límites y valores de referencia de las coordenadas ortométricas UTM. La imagen de la izquierda corresponde a la forma real a escala de la mitad norte de un huso.

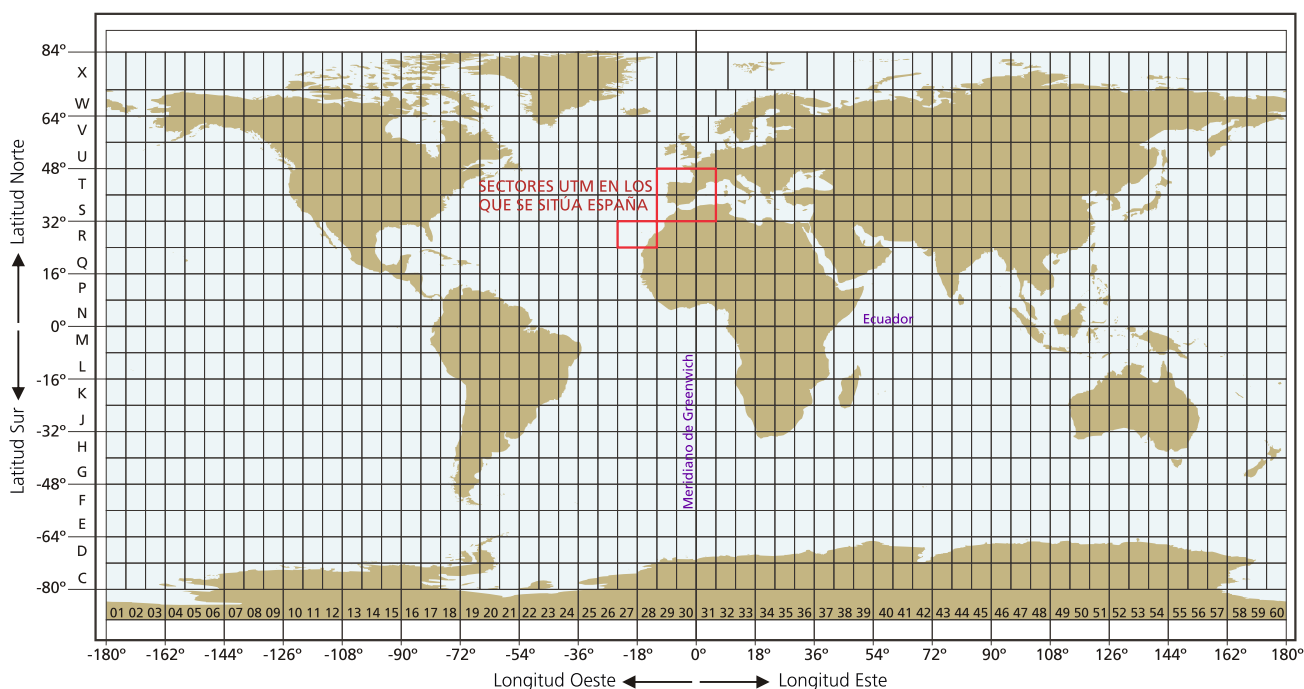


Figura 17. Mapa mundial esquemático con la disposición y nomenclatura de la rejilla UTM.

en el hemisferio Sur

-N, P, Q, R, S, T, U, V, W y X de Sur a Norte en el hemisferio Norte

Se excluyen las letras I y O para evitar la confusión con los números 1 y 0, y tampoco existe la letra Ñ al ser un sistema de origen anglosajón.

Toda la rejilla es regular salvo en dos casos, ambos en el extremo norte de Europa (rejillas 32V y 31X a 37X), en que se modifican sus límites para adaptarse a particularidades territoriales.

La confluencia de los husos y las zonas o bandas define los denominados **sectores**.

España está cubierta por ocho sectores UTM, seis para la península más Baleares (29S, 30S, 31S, 29T, 30T y 31T) y dos para Canarias (27T y 28T). Debido a que en el 27T sólo entra la mitad occidental de la isla de El Hierro, esta se suele incluir en el sector 28T mediante el procedimiento denominado de "forzado", para que todo el archipiélago canario esté dentro del mismo sector.

Una de las peculiaridades que caracteriza a la proyección UTM es que los valores de coordenadas no tienen continuidad, ya que cada huso utiliza su propio origen para la medición de estas. Hay dos orígenes por cada huso definiendo dos sistemas cartesianos independientes, uno para el hemisferio Norte y otro para el hemisferio Sur. Ambos puntos se sitúan en la intersección del meridiano central del huso con el Ecuador, pero se les asignan dos valores distintos para ambos hemisferios:

- Para el hemisferio Norte X de 500.000 como distancia respecto al Este (*Easting*) y que es una "falsa longitud Este" e Y de 0 como latitud, en este caso verdadera.

- Para el hemisferio Sur X de 500.000 como distancia respecto al Este (*Easting*) y que es una "falsa longitud Este" e Y de 10.000.000 como distancia respecto al Norte (*Northing*) y que es una "falsa latitud Norte".

Se consigue así que no haya nunca valores negativos de coordenadas. La longitud va disminuyendo desde el meridiano central del huso (con valor de 500.000) hacia el Oeste y se incrementa hacia el Este. Los valores que se alcanzan en los meridianos límite del huso son distintos según la latitud, dada la forma progresivamente más estrecha hacia los Polos,

por lo que la distancia en metros (valor de X) entre los dos meridianos, separados 6°, va disminuyendo desde el Ecuador hacia los Polos. En la Figura 16 pueden verse dichas distancias a diferentes latitudes. La notación de la longitud de un punto determinado tendrá, por tanto, 6 dígitos si se quiere una precisión de 1 m, 5 para una precisión de 10 m, 4 para una precisión de 100 m y 3 para una precisión de 1000 m o 1 km.

Por otra parte, la latitud, en el hemisferio Norte, irá aumentando su valor hacia el Norte desde cero coincidiendo con el Ecuador hasta algo menos de 9.329.300

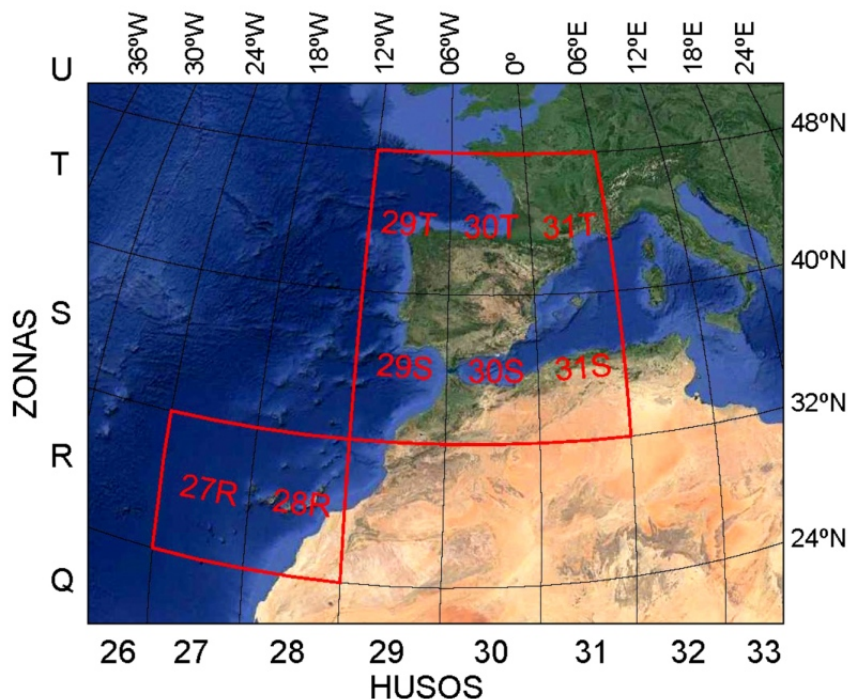


Figura 18. Mapa formado a partir de imágenes tomadas por satélites Landsat que muestra los sectores UTM que afectan a España.

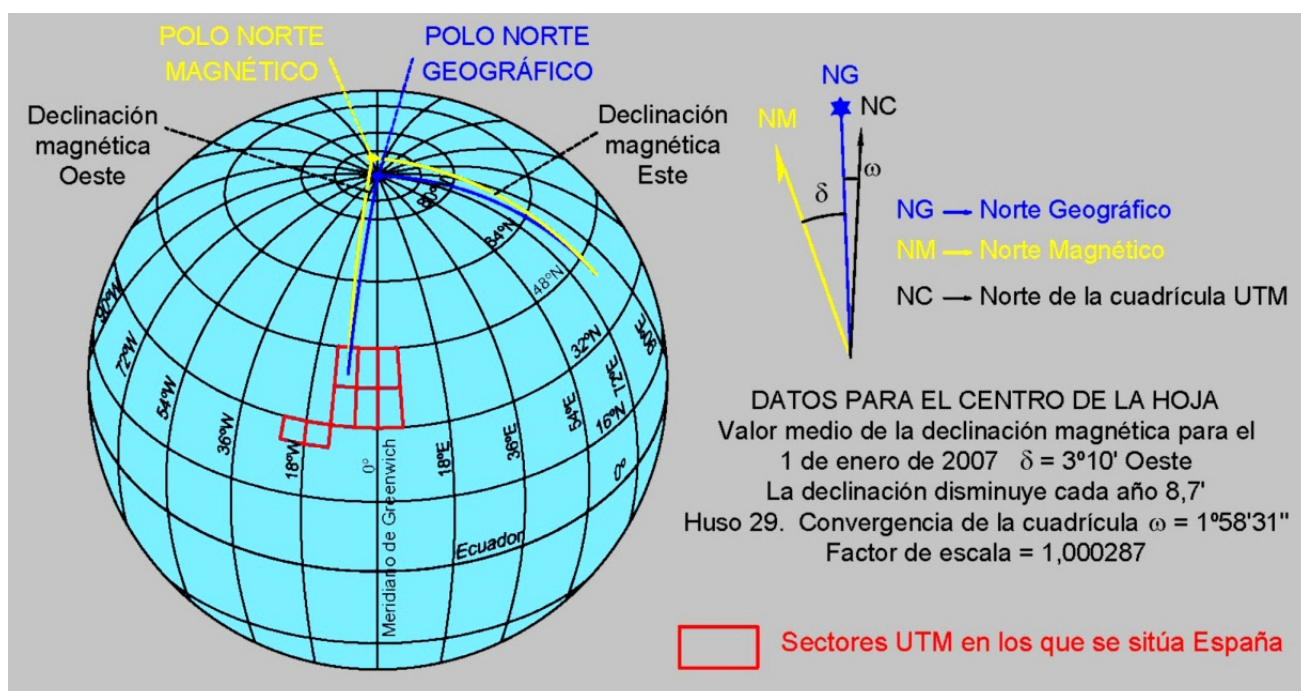


Figura 19. Esquema con la disposición de la declinación magnética Oeste (W) y Este (E) y la indicación de los datos que figuran en las hojas topográficas a escala 1:50.000 y 1:25.000 del Mapa Topográfico Nacional del IGN respecto a los tipos de norte (geográfico, magnético y de la cuadrícula) y a los valores de la declinación magnética, del ángulo de convergencia de la cuadrícula y del factor de escala, todos ellos referidos al centro de la hoja. Los datos corresponden a la hoja topográfica del MTN a escala 1:25.000 n° 102-1 Quintanilla de Babia (León).

a nivel del paralelo 84° , límite de aplicación de la proyección. En el hemisferio Sur, la latitud va disminuyendo en dirección Sur desde un valor origen de 10.000.000 en el Ecuador hasta algo menos de 1.117.000 a nivel del paralelo 80° , límite de aplicación de la proyección. Las distancias desde el Ecuador hacia el Norte (valor de Y) en la confluencia de los meridianos con los paralelos cada 16° (dos zonas o bandas de anchura) pueden verse, igualmente, en la Figura 16. Por tanto, la notación de la latitud de un punto determinado tendrá 7 dígitos si se quiere tener una precisión de 1 metro. Si la precisión requerida fuese de 10 m, el número de dígitos quedaría en 6, para una precisión de 100 m los dígitos serían 5 y para una precisión de 1000 m o 1 km el número de dígitos sería de 4. En lo referente a la precisión señalada de 1 m, 10 m, 100 m o 1 km, es necesario aclarar que no se refiere a que el punto pueda estar situado en una área que tenga de radio esos valores, sino que se refiere a que el punto puede estar en cualquier lugar de un cuadrado de tamaño 1×1 m, 10×10 m, 100×100 m o 1×1 km y cuyo vértice de referencia es el situado en la parte inferior izquierda.

Como ejemplo de notación UTM, y tomando como ejemplo la posición de Villablino (León), que tiene unas coordenadas geográficas en el sistema geodésico ETRS89 de $6^{\circ} 19' 15,47''$ W de longitud y $42^{\circ} 56' 22,84''$ N de latitud, le corresponden unas coordenadas UTM de ETRS89 29T X=718.583.2 e Y=4.757.598.7, siendo imprescindible indicar tanto la denominación del Sector UTM (huso 29 y zona T) como el sistema geodésico de referencia,

dado que las coordenadas UTM no están asociadas a ningún sistema geodésico concreto y difieren de un sistema a otro. En el ejemplo de Villablino, las coordenadas UTM referidas al Sistema Geodésico Europeo ED50 serían 29T 718.706.6 y 4.757.812.5, por lo que habría una diferencia de 123.4 m en X y 213.8 m en Y.

En las series MTN50 y MTN25, a escala 1:50.000 y 1:25.000, del Mapa Topográfico Nacional, puede verse el trazado de la malla UTM sobre el mapa con una separación kilométrica y, en los márgenes, tanto en el eje X de longitudes como en el eje Y de latitudes, el valor numérico de dicha malla cada 5 km en los mapas a escala 1:50.000 y cada 1 km en los mapas a escala 1:25.000.

En cuanto a la medición de las altitudes, el uso de la proyección UTM es compatible con cualquiera de los sistemas de referencia habituales que se usan para ello. Las altitudes se seguirán referenciando, por tanto, respecto al elipsoide, geode o nivel medio del mar, que es lo que se aplica en la mayoría de los países (en España el nivel medio del mar en Alicante, medido en el mareógrafo instalado en su puerto). La indicación de la referencia de altitudes siempre debe de estar señalada en formato de texto en todos los mapas topográficos.

La proyección UTM puede clasificarse, en función de sus características, como cilíndrica, transversa, conforme y compuesta. Aunque tiene a algunos inconvenientes, es universalmente utilizada, siendo la recomendada por la Asociación Internacional de Geodesia (AIG) para los mapas cartográficos de uso común

excepto para los de representación de grandes extensiones de territorios.

Orientación, declinación magnética y convergencia de la cuadrícula

Hay cuatro tipos de Norte fundamentales: norte astronómico, norte geodésico o verdadero, norte magnético y norte de la cuadrícula o malla. De ellos, sólo los tres últimos aparecen reflejados en la información que proporcionan los mapas topográficos.

•El Norte astronómico indica la posición del planeta Tierra respecto al resto del Sistema Solar y de la Galaxia. Uno de los diversos tipos de medición, quizás el más inmediato y fácil de establecer, es definir la orientación de su eje de rotación respecto a referencias astronómicas, siendo la más inmediata la posición de la Estrella Polar. Este tipo de Norte no se tiene en cuenta, evidentemente, para la realización de trabajos cartográficos.

•El Norte geodésico o Norte geográfico, denominado en muchas ocasiones Norte verdadero, sirve para señalar la dirección en que se encuentra la posición del eje de rotación terrestre. Aunque puede sufrir pequeñas variaciones en su posición, como por ejemplo, por los efectos producidos por fuertes terremotos, es extraordinariamente raro que se puedan apreciar. Es esencial a la hora de establecer la orientación de los mapas topográficos y geológicos. En los sistemas geodésicos actuales la posición del Norte geográfico está definida con una precisión muy grande, ya que el margen de error es, como mucho, de unos pocos centímetros. El Norte geodésico, geográfico o

verdadero aparece representado de forma gráfica en los mapas topográficos.

•El **Norte magnético** viene dado por la dirección marcada por una brújula desde cualquier punto de la superficie terrestre y depende de la orientación, en un momento determinado, de las líneas de fuerza del campo magnético que genera el núcleo de la Tierra. La aguja de la brújula siempre indicará la posición del polo magnético y no la del polo geográfico o norte verdadero, variando dicha posición de forma continua, pero con una velocidad variable. La diferencia angular entre la dirección del Polo Norte geográfico y la del Polo Norte magnético se llama **declinación magnética** y varía según la posición geográfica en que nos situemos. Al estar situado el Polo Norte magnético en el Norte de Canadá, durante muchos decenios, la declinación magnética en España siempre ha sido en dirección Oeste, es decir, había que restar a nuestras medidas con la brújula el valor angular de dicha declinación al medir las direcciones, por convenio, en el sentido de las agujas del reloj.

Actualmente, en el extremo oriental de la Península y en todas las Baleares la declinación magnética tiene dirección Este. Esto se debe a que el Polo Norte magnético está migrando a una elevada velocidad hacia el Norte de Siberia.

Para Villablino los valores de declinación magnética en los 6 últimos años serían de:

2014	2015	2016	2017	2018	2019
-2°13'	-2°04'	-1°56'	-1°48'	-1°39'	-1°31'

Las variaciones anuales estarían entre los -08' y los -09', con una media anual de -8'12". El signo negativo significa que la declinación es Oeste. Si continúa la tendencia de disminución actual, en poco más de 11 años habrá alcanzado el valor de 0° y comenzará una declinación magnética Este.

Los valores de declinación magnética para cualquier punto de la España peninsular y Baleares, desde el año 2005, puede verse en la página web del IGN www.ign.es/web/gmt-declination-magnetica. Para visualizar el valor de la declinación magnética en cualquier lugar

del mundo se puede acceder a la web www.magnetic-declination.com/.

En los mapas topográficos, aparece indicado el valor medio de la declinación magnética para el centro de cada hoja y la fecha de toma de dicho valor.

•El **Norte de la cuadrícula o malla** viene definido por la dirección que marcan las líneas de la cuadrícula de coordenadas hacia el Norte, que no coincidirá en la mayoría de las ocasiones con el Norte geográfico o verdadero. En el caso de la proyección UTM, la cuadrícula ortogonal de coordenadas solo estará alineada con el Norte geográfico en los puntos situados sobre los meridianos centrales de cada huso. El valor de la diferencia angular entre el Norte de la cuadrícula y el Norte geográfico o verdadero se denomina **convergencia de la cuadrícula** y aparecerá reflejado tanto de forma gráfica, mediante una dirección, como numérica en formato sexagesimal de grados, minutos y segundos, para el centro de la hoja o mapa.

Bibliografía y páginas web consultadas y de referencia para saber más

- Alonso Fernández-Coppel, I. (2001). *Las coordenadas geográficas y la proyección UTM*. Univ. de Valladolid, 85 pp.
- Alonso Sarria, F. (2006). *Cartografía y Geodesia. Sistemas de Proyección*, Cap.1, Temario SIGMUR, Universidad de Murcia, 24 pp.
- Coe, A. L. Ed. (2010). *Geological field techniques*. Blackwell Publishing Ltd., The Open University, Milton Keynes, United Kingdom, 323 pp.
- Consejo Superior Geográfico (2007). *Necesidad de un nuevo "Datum"*. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 13 pp.
- Espiago, J. (2016). *Proyecciones Cartográficas. Sistemas UTM-ETRS89*-Cap. 3. *Temario Cartografía para la Geografía*, Universidad Autónoma de Madrid, 21 pp.
- Instituto Geográfico Nacional (2017). *Geodesia*. Centro Geográfico Nacional, Madrid, 43 pp.
- Lisle, R. J., Brabham, P.J. y Barnes, J. W. (2011). *Basic Geological mapping*. The Geological field guide series, Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons Ltd., Chichester-England, 221 pp.
- Pérez Cerdán, F., Orozco Cuenca, M. T. y González Fernández, M. I. (2012). *Informe técnico: Especificaciones para la digitalización de la Cartografía Geológica MAGNA en formato digital*. IGME, Madrid, 57 pp.
- Pozo Rodríguez, M., González Yélamos, J. y Giner Robles, J. (2003). *Geología práctica. Introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas*. Pearson Prentice Hall, Madrid, 339 pp.

Beidou Navigation Satellite System (Official web China GNSS): en.beidou.gov.cn/

EL GPS (Página GPS Española): <https://www.elgps.com/>

ESA (European Space Agency) EGNOS: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/EGNOS/

ESA (European Space Agency) Galileo: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/

ESA (European Space Agency) Navipedia: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Main_Page

ETRS-ETRF (European Terrestrial Reference System and Frame): <http://etrs89.ensg.ign.fr/>

EUREF Permanent GNSS Network: www.epncb.eu/

European GSA (Global Navigation Satellite Systems Agency): <https://www.gsa.europa.eu/#close>

EVRS (European Vertical Reference System): <https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/Home/home.html>

GLONASS (Official web Russian GNSS): <https://web.archive.org/web/20111123091353/http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en>

GPS (Official U.S. government information about the Global Positioning System): <https://www.gps.gov/>

GSA (European GNSS Agency): <https://www.gsa.europa.eu/>

IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service): https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html

IGME (Instituto Geológico y Minero de España): www.igme.es/default.asp

IGN (Instituto Geográfico Nacional) - Centro de Información Geográfica: www.ign.es/web/ign/portal/inicio

IGS (International GNSS Service): www.igs.org/

ISRO (Indian Space Research Organisation): <https://www.isro.gov.in/>

ITRF (International Terrestrial Reference Frame): itrf.ensg.ign.fr/

NGA (National Geospatial-Intelligence Agency EE.UU.):

<https://web.archive.org/web/20120330004945/https://www1.nga.mil/Pages/default.aspx>

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System): qzss.go.jp/en/index.html

SDCM (System of Differential Correction and Monitoring): www.sdc.ru/index_eng.html

Para citar este artículo: Peláez Fernández, J. I. (2019). Toma básica de datos en Geología. Mediciones en el campo y manejo de mapas topográficos y geológicos. *GeoLaciana 2019*. Aula Geológica Robles de Laciana. Pp: 19-32.