

# GNSS: GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU

## Fundamentos y métodos de posicionamiento

José Luis Berné Valero | Natalia Garrido Villén  
Raquel Capilla Romá



---

# **GNSS: GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU**

## **Fundamentos y métodos de posicionamiento**

---

José Luis Berné Valero  
Natalia Garrido Villén  
Raquel Capilla Romá



**Editorial**  
Universitat Politècnica  
de València

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Berné Valero, José Luis; Garrido Villén, Natalia; Capilla Romá, Raquel (2019) *GNSS: GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU. Fundamentos y métodos de posicionamiento*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© José Luis Berné Valero  
Natalia Garrido Villén  
Raquel Capilla Romá

© 2019, Editorial Universitat Politècnica de València  
Venta: [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.: 0843\_03\_01\_01

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-9048-777-8  
Impreso bajo demanda

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es).

Impreso en España

# Agradecimientos

Este libro se dedica a nuestras familias por su generosidad y afecto continuo, y a nuestros alumnos por su compromiso con el aprendizaje, para que sigan luchando por sus sueños, pero sin perder nunca los valores y referencia de la vida.

**“Mientras los ríos corran al mar y haya estrellas en el cielo, debe durar la memoria del beneficio recibido en la mente del hombre agradecido”.**

*Virgilio*

Gracias por una nueva oportunidad:

María Jesús, Iratxe Zarragoikoetxea, Luis Martínez, Lucía Doñate, Heredia.

Valencia, febrero 2019

José Luis Berné Valero

## Nota al lector

Los autores ofrecen material complementario a aquellos que lo requieran para el uso docente de este libro, tal como presentaciones en ppt. y documentos resumen en pdf.

Podrán solicitarse dirigiéndose al correo [jlberne@upvnet.upv.es](mailto:jlberne@upvnet.upv.es)



# Prólogo

Este libro trata todos los sistemas GNSS globales (GPS, GALILEO, GLONASS y BeiDOU), sus señales, constelaciones y marcos de referencia. Hay un bloque dedicado al estudio y forma de eliminar sus errores, especialmente el tema de atmósfera, y con un amplio tratamiento de la Troposfera. Así mismo se desarrollan y explican los diversos métodos de posicionamiento y especialmente todo lo referido al método estático y aplicación a cálculo de redes topográficas y redes geodésicas, con un capítulo sobre análisis estadístico. Posteriormente, se abordan los levantamientos topográficos por correcciones diferenciales RTK. Se incluye un capítulo muy desarrollado sobre el PPP. Se explican también los diversos sistemas GNSS diferencial incluidos los de grandes áreas. Finalmente se desarrolla un tema de estaciones permanentes GNSS, y Altimetría satelital.

Por posicionamiento se entiende a la determinación en el espacio de objetos móviles o estacionarios en un sistema de coordenadas determinado, para ello varias son las técnicas que se aplican. Pero sin duda alguna en el campo de la navegación, de la georreferenciación y del posicionamiento preciso en la Tierra, las técnicas apoyadas en satélites artificiales son actualmente las de mayor importancia, fundamentalmente en espacios abiertos, aunque la generalización del posicionamiento en otros espacios, abre nuevas puertas a otras técnicas para el posicionamiento de interiores e incluso bajo el agua. Hablar de posicionamiento requiere hablar de GNSS como un sistema global de posicionamiento y navegación.

La georreferenciación es la técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas y datum específicos.

El término de GNSS (Global Navigation Satellite System) es el nombre genérico que engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite, que proporcionan posicionamiento y navegación así como el mejor sistema de definición de tiempos (PNT) con cobertura global, tanto de forma autónoma, como con sistemas de aumentación. El sistema global de navegación por satélite (GNSS) es la infraestructura espacial de satélites generadores de señales que permite a los usuarios de receptores con un dispositivo compatible, determinar su posición, velocidad y tiempo (PVT) mediante el procesamiento de las señales de los satélites. Las señales GNSS son proporcionadas por cuatro constelaciones de carácter global (GPS, GLONASS, GALILEO y BeiDou), y dos regionales (QZSS o IRNSS), que a menudo se complementan con sistemas de aumentación, basados en satélites (SBAS), como EGNOS.

En esta nueva etapa de la revolución industrial, las nuevas tecnologías geoespaciales y el geoposicionamiento juegan un papel fundamental en el espacio del internet del consumidor. El mercado GNSS está evolucionando de tal manera que todos los países quieren ser partícipes del valor estratégico, tecnológico, económico, y social del posicionamiento. El término posicionamiento abarca todo el espacio de trabajo y cada vez son más las aplicaciones que está ocupando, desde la más alta precisión en posicionamiento del orden del mm y del tiempo, hasta la integración con *chipsets* en miniatura en relojes, móviles *smartphone* o incluso ropa para rastrear la ubicación. Estamos en un mundo donde la ubicación se está convirtiendo en el punto central de casi todas las decisiones. "*La ubicación proporciona la huella para que el gestor pueda tomar decisiones inteligentes*", dice Mladen Stojic, presidente de Hexagon Geospatial. "*Si no sabe dónde se encuentra, no puede tomar decisiones sobre una situación determinada*". Un estudio exclusivo de Geospatial Media and Communications, segmenta ampliamente el ecosistema de la tecnología geoespacial en cuatro categorías, GNSS y Posicionamiento, GIS y Análisis Espaciales, Observación de la Tierra y Escaneo 3D.

*La navegación por satélite (junto con la observación de la Tierra) es probablemente el sector espacial con mayor potencial de crecimiento tanto en términos de sistemas en desarrollo (upstream) como de posibilidades de negocio en el desarrollo de aplicaciones (downstream)* (Javier Ventura, ESA. Valencia 2013).

Según datos del informe del mercado GNSS, se preveía ya que el mercado global GNSS, que comprende tanto dispositivos (por ejemplo, receptores GNSS) como servicios de aumento (que se relacionan con todos los servicios que soportan directamente el sistema GNSS, por ejemplo, aumento y corrección), crecería un 6,4% anual entre 2015 y 2020.

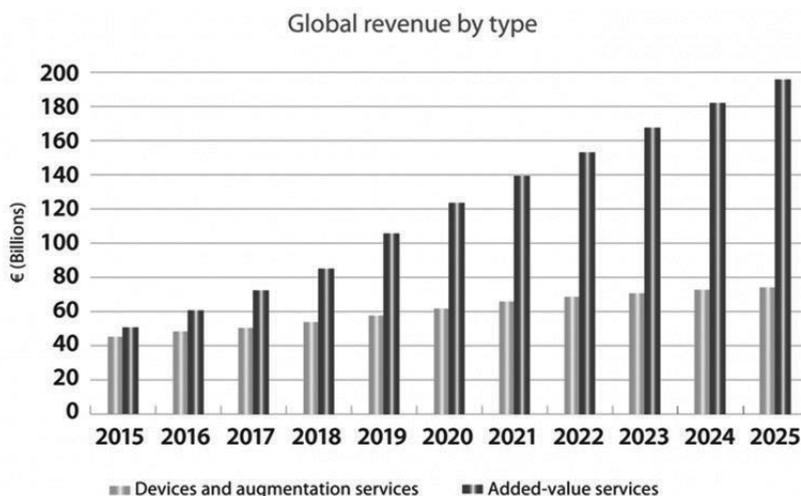
El informe GNSS 2017 de la ESA proporciona un análisis exhaustivo de las tendencias mundiales y los últimos desarrollos en términos de envíos, ingresos y la base instalada

de dispositivos y aplicaciones GNSS en segmentos clave del mercado GNSS, tanto en el mercado masivo como en el profesional. Los segmentos cubiertos incluyen: agricultura, aviación, servicios basados en la ubicación (LBS), marítimo, ferroviario, vial, Topografía y sincronización.

Con la llegada de 5G, se va a generar una rápida proliferación y diversificación de servicios de valor agregado.

En el mercado de GNSS y posicionamiento su aplicación se estructura en tres grandes sectores de usuarios, de acuerdo a las soluciones y precisiones que requieren:

- Soluciones para el mercado masivo: presentando receptores de gran volumen para dispositivos de consumo. La cobertura automotriz (no crítica para la seguridad), los drones de consumo, los teléfonos inteligentes.
- Soluciones críticas para la seguridad y la responsabilidad en el transporte: automóviles, aviación, drones profesionales, marítimos, búsqueda y rescate.
- Soluciones de alta precisión y sincronización: los receptores de presentación están diseñados para ofrecer la mayor precisión (posición o tiempo) posible. Las aplicaciones de agricultura, SIG, Topografía y sincronización están cubiertas.



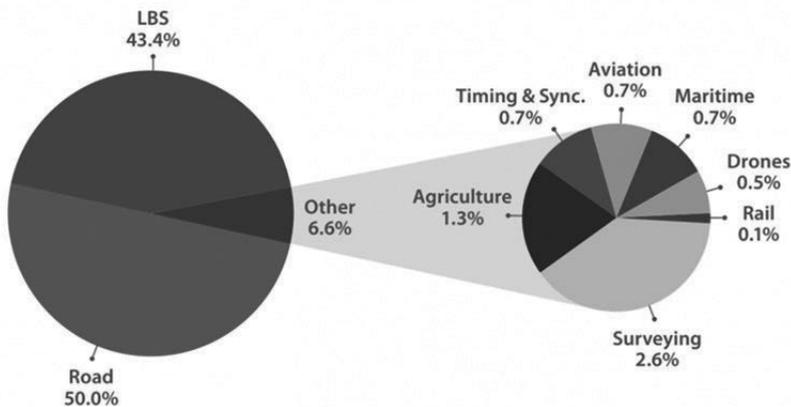
Fuente: ESA

**Figura 1. Ingresos globales por tipo informe GNSS**

El mercado global de aplicaciones GNSS, que comprende tanto dispositivos como servicios de aumentación (véase Figura 1), se prevé que crezca un 6,4% anual entre 2015 y 2020 para después desacelerar ligeramente a 3,8% hacia 2025. Esto se debe principalmente a la creciente madurez del mercado global GNSS, que conlleva a una mayor competencia y una mayor presión sobre los precios.

El mercado GNSS, como se muestra en la Figura 2, se puede dividir en diferentes segmentos clave, cada uno con características específicas y atendiendo a las diferentes necesidades de los usuarios:

- Agricultura
- Aviación
- Servicios basados en localización (LBS)
- Marítimo
- Ferroviario
- Vial
- Cartografía y Topografía
- Sincronización y tiempo



Fuente: GeoBuiz 2018

**Figura 2. Porcentaje de mercado por servicios**

El informe GeoBuiz-18 estima que la industria de GNSS y Posicionamiento es la más grande del universo geoespacial. Se presume que el tamaño del mercado crezca para alcanzar los 260.800 millones de dólares entre 2018 y 2020. En el Informe de Mercado GNSS 2017 de GSA, Carlos des Dorides, Director Ejecutivo de la Agencia Europea GNSS, aboga por la tendencia creciente: *"La creciente demanda de información precisa sobre la ubicación, en combinación con la evolución continua de la tecnología GNSS, significa que el mercado GNSS de hoy es más grande que nunca, con un estimado de 5 mil millones de dispositivos GNSS en uso en todo el mundo (se espera que el número crezca a 8 mil millones para 2020)"*. El informe también establece que se

espera que el mercado global de GNSS crezca de 5,8 mil millones de dispositivos en uso en 2017 a un estimado de 8 mil millones para 2020.

El tamaño del mercado del segmento topográfico, se espera que llegue aproximadamente 49 mil millones de dólares para 2020 a medida que los dominios de aplicación (infraestructura, catastro, utilidades, minería, etc.) y la base de clientes se amplíen significativamente.

### **Teléfonos inteligentes con sistemas GNSS**

Los teléfonos inteligentes con receptores GNSS de doble frecuencia (L1 / E1 + L5 / E5) han llegado recientemente al mercado (el primero es el Mi 8 de Xiaomi), y destacan por su precisión de ubicación sin precedentes. Estos teléfonos inteligentes utilizarán el chip receptor Broadcom BCM47755 de doble frecuencia GNSS, introducido en 2017 y el primero diseñado y producido para el mercado masivo.

El chip BCM47755 utiliza las señales L5 / E5 más avanzadas de GALILEO y los satélites GPS más recientes, además de las señales L1 / E1 tradicionales. El BCM47755 es capaz de fijar con una precisión de treinta centímetros, y también mitiga algunos errores GNSS.

A medida que estos teléfonos inteligentes GNSS de doble frecuencia estén disponibles en el mercado, mostrarán la contribución crítica de GALILEO a la precisión, porque si las señales de GALILEO no estuvieran disponibles, más de la mitad de las señales de L5 / E5 desaparecerían y el chip volvería al rendimiento tradicional de L1 / E1.

El GNSS de doble frecuencia pronto se convertirá en un factor de diferenciación del rendimiento, por lo que los teléfonos inteligentes de próxima generación se clasificarán según la calidad de su receptor GNSS. Los clientes considerarán la tecnología GNSS en el teléfono inteligente como uno de los factores al seleccionar el dispositivo que desean comprar.

La nueva solución es capaz de ofrecer una precisión centimétrica con un consumo mínimo de energía y un tamaño reducido para expandir rápidamente las aplicaciones de posicionamiento preciso, dijo la compañía.

El software Starling de Swift es independiente del receptor GNSS y funciona con una variedad de chips GNSS y sensores de inercia. De acuerdo con la compañía, Starling cuenta con soporte multibanda y multi-constelación para proporcionar una precisión de centímetro y soporta el cálculo de salidas de integridad para proporcionar una posición absoluta, velocidad y tiempo (PVT).

El BCM47755 admite simultáneamente GPS y GLONASS en la banda de frecuencia L1 o GPS y GALILEO en las bandas de frecuencia L1 / E1 y L5 / E5a, agregó la compañía. Starling combina las observaciones sin formato GNSS del BCM47755 con las correcciones del servicio Swlar's Skylark Cloud Corrections para ofrecer un posicionamiento de nivel de centímetro.

Hasta ahora, las aplicaciones basadas en la ubicación móvil han sido alimentadas por receptores GNSS de frecuencia única que operan bajo una estricta potencia de la batería y restricciones de espacio.

La disponibilidad ampliada de las frecuencias L1 / E1 y L5 / E5 en las constelaciones de satélites permite el uso de dos frecuencias para calcular la posición de forma mucho más precisa tanto en entornos urbanos como de áreas abiertas.

Con las nuevas señales, primero se calculará la posición aproximada con L1 y luego se refinará con una nueva señal más moderna tipo L5.

La señal L5 es menos propensa a lo que se conocen como distorsiones de trayectos múltiples que la señal L1, y dará una posición más exacta.

**El posicionamiento en interiores (indoor positioning)** es la fuerte apuesta para los próximos años. Aun cuando existen diversas tecnologías que podrían utilizarse para mejorar los datos en esta área, como son la banda ultraancha, acelerómetros e identificación por radiofrecuencia (RFID), no existe hasta ahora una tecnología que ofrezca la amplia cobertura que se esperará en los próximos años.

En un futuro próximo es posible que se desarrollen técnicas de posicionamiento analizando el campo magnético y gravitacional (basada en átomos de rubidio), y puedan ser utilizadas en el movimiento submarino. En esta línea se está trabajando con la “brújula cuántica”, y surgirá el **sistema de posicionamiento cuántico** CPE, sistema que no necesitará satélites. Su uso se orienta justo en la dirección opuesta, el interior de la Tierra y sus campos magnéticos. A partir de las fluctuaciones de estas zonas y rastreando señales, ubicará otros dispositivos, así como barcos, teléfonos móviles o aviones.

En la actualidad las técnicas, procedimientos e instrumental de los sistemas GNSS son tan amplios, como amplia es su aplicación y extensión de uso, desde la decena de metros para un excursionista y un navegador GNSS o reloj con posicionamiento GNSS, pasando por la navegación y el metro, a la Cartografía y el decímetro, hasta el milímetro y la Geodesia (Véase Figura 3).

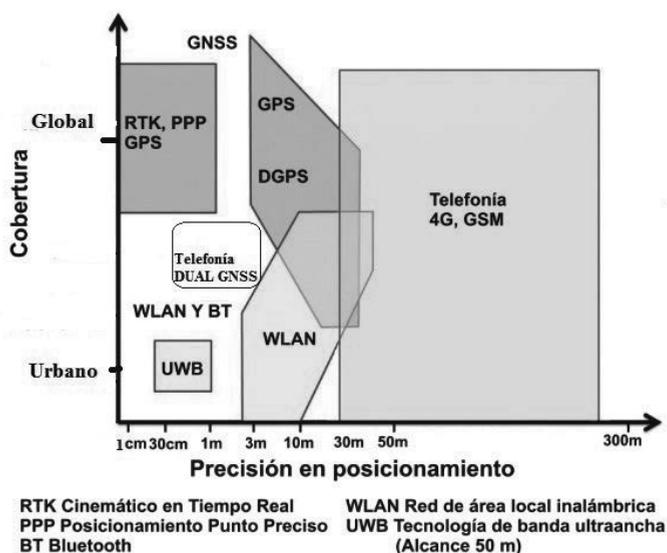


Figura 3. Precisión en posicionamiento

Desde el punto de vista geodésico, los marcos de referencia se están definiendo con mayor precisión en cada repetición, a medida que se desarrollan la tecnología y las nuevas técnicas. Todo ello debido al impulso adicional con los sistemas GNSS y otros medios de observación espacial, como la medición láser por satélite (SLR, satellite laser ranging), Interferometría de base muy larga (VLBI, very long baseline interferometry) y orbitografía Doppler y radioposicionamiento integrado por satélite (DORIS).

Los marcos de referencia nacionales están cada vez más alineados con marcos de referencia geodésicos estandarizados a nivel global (por ejemplo, el Marco de Referencia Internacional Terrestre ITRF, International Terrestrial Reference Frame), al igual que los marcos de referencia GNSS. Con ello se facilita la interoperabilidad y unificación de los paquetes de datos de información geoespacial en el planeta y ganarán mayor importancia en los próximos cinco a diez años.

Gracias a que GPS y GALILEO trabajan juntos, el mundo puede esperar una navegación más precisa. El uso de los datos proporcionados por estos dos sistemas brindará servicios de emergencia mejorados, una aviación más segura y muchas otras aplicaciones que impulsarán nuevas innovaciones empresariales, como los automóviles automatizados y el Internet de las cosas.

Desde el punto de vista topográfico y geodésico el sistema GNSS supuso una revolución, propia de una Geodesia global y de unas precisiones milimétricas. Para poder garantizar precisiones centimétricas o milimétricas en Topografía y Geodesia, y trabajar en marcos de referencia internacionales, se requiere de un conocimiento amplio en cálculos y en conocimientos de sistemas y marcos de referencia.

En este libro se introducen algunos conceptos sobre Geodesia satelital y marcos de referencia, para poder explicar la aplicación del GNSS a estos campos de exigidas precisiones. Se explican las ideas y algoritmos básicos de posicionamiento, pero dentro de la precisión centimétrica, con fines de Topografía y Geodesia, dejando para otro tratado las aplicaciones en agricultura de precisión, Cartografía y navegación.

El posicionamiento es una oportunidad de negocio, en él se mezclan varias técnicas y procedimientos, los sistemas GNSS, la telefonía, internet, redes inalámbricas, ultrasonidos, banda ultra-ancha, posicionamiento cuántico... donde tiene cabida la aportación de diversos profesionales.

# Índice

Agradecimientos .....	I
Prólogo.....	III
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Definición de Geomática y Geodesia .....	1
1.2. Geodesia espacial .....	4
1.3. Sistemas de Observación Global GGOS .....	4
1.4. SLR Satellite Laser Ranging .....	7
1.5. VLBI Very long Baseline Interferometry .....	11
1.6. DORIS .....	13
1.6.1. Constelación en órbita actual .....	14
1.7. Técnicas utilizadas para el cálculo de los diferentes parámetros .....	15
1.8. GNSS .....	15
1.8.1. Componentes GNSS.....	19
1.9. Instituciones y organismos vinculados a la geodesia y GNSS.....	19
1.9.1. La Unión Internacional de Geodesia y Geofísica IUGG.....	19
1.9.2. IAG, Asociación Internacional de Geodesia .....	20

1.9.3. IERS International Earth Rotation and Reference Systems.....	20
1.9.4. IGS Servicio Internacional GNSS .....	21
1.9.5. CODE. Centro de Determinación de Órbitas en Europa .....	22
1.9.6. EUREF .....	23
Capítulo 2. La Tierra. Sistemas de referencia y sistemas de tiempos.....	25
2.1. Introducción.....	25
2.2. Elipsoide de revolución internacional GRS-80 y WGS-84.....	27
2.2.1. Elipsoide GRS80 .....	27
2.2.2. Sistema de referencia geodésico de WGS 84 .....	27
2.3. Sistemas de referencia ICRS, ITRS y GCRS.....	29
2.4. Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS). Internationa Terrestrial Reference System .....	31
2.4.1. El marco de referencia internacional terrestre ITRF.....	32
2.5. Marco de referencia GNSS. Materialización del ITRS: IGSy .....	37
2.6. Movimientos de la Tierra.....	39
2.6.1. La Traslación .....	39
2.6.2. La Rotación .....	39
2.7. Precesión y nutación .....	40
2.7.1. Precesión.....	40
2.7.2. Nutación .....	41
2.8. Movimiento del Polo.....	41
2.8.1. Conventional International Origen, (CIO), y Polo Celeste de Efemérides, (CEP).....	42
2.8.2. Parámetros de orientación de la Tierra .....	42
2.9. Fenómenos que producen variación de coordenadas. Tectónica de placas.....	45
2.10. Sistemas locales de referencia. ETRS89 datum europeo .....	48
2.10.1. Transformación entre ITRS-ETRS89 .....	50
2.10.2. Proyecto EUVN (European Vertical Reference Network) .....	50
2.10.3. Sistema y marco de referencia en América Latina y Caribe: SIRGAS ..	50

2.11. Otros sistemas de referencia GNSS .....	51
2.11.1. GLONASS. PZ-90.11.....	51
2.11.2. Marco de referencia terrestre de GALILEO.....	51
2.11.3. Sistema geodésico Chino de Coordenadas (CGC2000) .....	53
2.12. Sistema de tiempos. Tiempo Solar y universal UT.....	53
2.12.1. Escalas de tiempos .....	53
2.13. Tiempo GNSS.....	57
<b>Capítulo 3. Órbitas de los satélites .....</b>	<b>59</b>
3.1. Teoría de órbitas. Elementos keplerianos .....	59
3.2. Almanaque.....	67
3.3. Movimiento perturbado .....	69
3.4. Efecto gravitatorio terrestre por no esfericidad de la Tierra .....	72
3.5. Perturbaciones gravitacionales en la órbita satelital debidas al efecto gravitacional de la Luna y el Sol.....	75
3.5.1. Efectos indirectos de la gravitación lunar y solar. Mareas.....	77
3.6. Otras perturbaciones .....	77
3.6.1. Presión por radiación solar .....	77
3.6.2. Fricción atmosférica.....	78
3.6.3. Efectos relativistas.....	78
3.7. Efemérides radiodifundidas. Broadcast Ephemeris .....	78
3.7.1. Nomenclatura de Efemérides .....	83
3.8. Efemérides precisas .....	88
3.8.1. Productos finales IGS (IGS).....	89
3.8.2. Productos IGS Rapid (IGR) .....	89
3.8.3. IGS Ultra-rapid productos (IGU) .....	89
3.9. Ejercicio órbitas.....	91

Capítulo 4. GNSS. Sistema Global de Navegación por Satélite .....	105
4.1. Introducción .....	105
4.1.1. Satélites con aplicaciones en ciencias de la Tierra .....	106
4.1.2. Evolución de los sistemas GNSS.....	107
4.2. Principio básico del posicionamiento con GNSS.....	109
4.2.1. Medición de velocidad.....	111
4.3. Constelación NAVSTAR – Sistema GPS. 1978 .....	112
4.3.1. Segmento espacial .....	113
4.3.2. Segmento control.....	120
4.3.3. Segmento usuario .....	122
4.3.4. Señales .....	123
4.3.5. Servicios .....	125
4.3.6. Sistema de tiempos .....	126
4.3.7. Sistema de coordenadas.....	126
4.4. GALILEO .....	126
4.4.1. Segmento espacial .....	129
4.4.2. Segmento Tierra .....	131
4.4.3. Señales .....	133
4.4.4. Servicios .....	135
4.4.5. Sistema de tiempos .....	136
4.4.6. Sistema coordenadas.....	137
4.5. GLONASS .....	137
4.5.1. Segmento espacial .....	137
4.5.2. Segmento control.....	140
4.5.3. Señales.....	141
4.5.4. Sistema coordenadas.....	144
4.5.5. Sistema tiempos.....	144

4.6. BeiDou. COMPASS .....	144
4.6.1. Constelación BeiDou.....	144
4.6.2. Señales.....	145
4.6.3. Sistema de referencia .....	145
4.6.4. Sistema de tiempos.....	145
4.7. Multiconstelación .....	146
4.8. Sistemas regionales de navegación o aumentación .....	147
4.8.1. QZSS (Quasi Zenit Satellite System).....	147
4.8.2. IRNSS/NAVIC.....	149
4.9. Sistemas de aumentación.....	150
4.9.1. SBAS (Sistema de Aumentación Basado en Satélites) .....	151
4.9.2. El sistema WAAS.....	155
4.9.3. EGNOS. European Geostationary Navigation Overlay Service.....	156
4.10. Sistemas de aumentación en posicionamiento y navegación.....	157
4.11. A-GNSS (GNSS Asistido).....	158
Capítulo 5. La señal.....	161
5.1. Reloj u oscil-lador .....	161
5.1.1. Oscilador Generación de señales GALILEO .....	163
5.2. Fundamentos físicos de la señal .....	165
5.2.1. Preparación y emisión de la señal GNSS .....	170
5.3. Señal GPS .....	174
5.3.1. Portadora .....	176
5.3.2. Códigos .....	179
5.3.3. Mensajes.....	181
5.3.4. Mejora señal GPS.....	183
5.4. GALILEO.....	189
5.4.1. Códigos .....	196
5.4.2. Mensajes.....	197

5.5. GLONASS .....	200
5.6. BEIDOU o COMPASS.....	202
5.6.1. Señal .....	202
5.7. Receptor y antena.....	204
5.7.1. Receptor.....	204
5.7.2. Antena.....	205
Capítulo 6. Observables .....	207
6.1. Tipos de observables.....	207
6.2. Pseudodistancias .....	208
6.3. Fase .....	212
6.4. Combinaciones de señales .....	217
6.4.1. Combinación banda estrecha. Narrow lane NL o LN.....	218
6.4.2. Combinación banda ancha. Wide lane WL .....	219
6.4.3. La combinación distancia geométrica .....	219
6.4.4. Combinación libre ionosfera.....	219
6.4.5. Combinación de pseudodistancia de código P y fase $\emptyset$ , suavizado de código.....	220
6.4.6. Melbourne-Wübbena (1985), MW .....	220
6.4.7. Combinaciones de triple frecuencia.....	220
6.5. Detección y reparación de la pérdida de ciclos .....	222
6.6. RINEX. Observables.....	224
6.6.1. Nomenclatura de los ficheros RINEX versión 2 .....	225
6.6.2. Nomenclatura de un fichero RINEX 3.03 .....	225
6.6.3. Formato CRINEX.....	226
6.6.4. Formato SINEX.....	226
6.6.5. Chequeo de observables (teqc).....	226
6.6.6. Estructura de los ficheros RINEX .....	227
6.7. Fichero de navegación RINEX .....	231

6.8. Fichero datos meteorológicos versión RINEX 3 .....	232
6.9. Descarga de datos RINEX .....	233
6.9.1. Descarga de datos EUREF .....	233
6.9.2. Descarga de datos del IGN .....	234
6.9.3. Descarga de datos ICV .....	235
6.10. Ejercicio .....	235
<b>Capítulo 7. Fuentes de error GNSS .....</b>	<b>241</b>
7.1. Fuentes de error .....	241
7.2. Observable fase .....	243
7.3. Errores en satélites y órbitas .....	244
7.3.1. Errores en los parámetros orbitales del satélite .....	244
7.3.2. Offset de la antena del satélite .....	247
7.3.3. WIND-UP .....	248
7.3.4. Errores en los relojes de los satélites .....	249
7.3.5. Errores relativistas .....	252
7.3.6. Disponibilidad Selectiva. SA .....	253
7.3.7. Anti-Spoofing AS .....	254
7.4. Errores atmosféricos .....	254
7.4.1. Ionosfera .....	255
7.4.2. La Troposfera .....	257
7.5. Errores del receptor .....	259
7.5.1. Pérdidas de ciclo. Cycle Slips .....	259
7.5.2. Retardo instrumental .....	259
7.5.3. Efecto multipath o trayectoria múltiple .....	260
7.5.4. Estado del reloj del receptor .....	260
7.5.5. Offset y variación del centro de fase de la antena del receptor .....	261

7.6. Errores intencionados con aparatos externos al sistema .....	264
7.6.1. Jamming .....	265
7.6.2. Meaconing .....	265
7.6.3. Spoofing .....	265
7.6.4. Interferencias electromagnéticas .....	265
7.7. Retardos de señal no calibrados y bias entre observables .....	266
7.7.1. Bias entre sistemas (ISB) y bias entre frecuencias (IFB) .....	266
7.7.2. Retardos de fase no calibrados (UPD).....	267
7.7.3. Sesgos entre observables de código.....	268
7.8. Indicadores de precisión .....	269
7.8.1. UERE (User Equivalent Range Error).....	269
7.8.2. DOP Contribución de la geometría de los satélites a la incertidumbre de un posicionamiento.....	270
7.8.3. Parámetros estadísticos de precisión e incertidumbre vinculados a navegación.....	273
Capítulo 8. La Ionosfera .....	275
8.1. Propagación de emisiones radioeléctricas.....	275
8.2. Ionosfera .....	277
8.3. Elementos de propagación de ondas .....	282
8.3.1. Relación de velocidad e índice de refracción de fase y de grupo .....	283
8.4. Refracción ionosférica. Relación de velocidades de grupo y fase y la velocidad en el vacío .....	285
8.4.1. Determinación del $\Delta\text{phIono}$ y del $\Delta\text{grIono}$ .....	287
8.5. Eliminación del efecto ionosférico .....	289
8.5.1. Eliminación del efecto ionosférico en receptores de doble frecuencia. Caso de pseudodistancia de código .....	290
8.6. Modelos ionosféricos y medición TEC.....	292
8.6.1. Modelos TEC.....	292
8.6.2. Modelos ionosféricos.....	294

8.7. Acerca de LEICA Geo Office (LGO).....	296
8.7.1. Modelo ionosférico .....	296
Capítulo 9. Refracción troposférica .....	299
9.1. Atmósfera y Troposfera.....	299
9.2. Refracción Troposférica .....	302
9.3. Índice de refracción, refractividad y retraso troposférico .....	304
9.4. Modelos troposféricos .....	311
9.4.1. Modelos clásicos. Modelo de Hopfield y modelo de Saastamoinen .....	312
9.5. Modelos meteorológicos.....	317
9.5.1. La Atmósfera Estándar Internacional ISA .....	318
9.5.2. Modelos numéricos del clima.....	319
9.6. Mapping Functions.....	329
9.6.1. Marini Mapping Function (1972).....	330
9.6.2. Niell Mapping Function (1996).....	332
9.6.3. Isobaric Mapping Function (IMF).....	335
9.6.4. Funciones de mapeo más usuales.....	336
9.7. Ray tracing.....	340
9.8. Gradiente troposférico .....	343
9.9. Modelos software comercial.....	348
9.9.1. Modelo troposférico Leica Geoffice .....	348
9.9.2. Modelo troposférico Trimble .....	349
9.9.3. Comparativa .....	350
9.10. Meteorología GNSS y vapor de agua .....	351
9.11. Radiosondeos.....	356
9.12. E-GVAP.....	358

Capítulo 10. Métodos de observación y posicionamiento GNSS .....	361
10.1. Métodos de observación .....	361
10.1.1. Según los observables.....	361
10.1.2. Según el movimiento de los receptores .....	362
10.1.3. Según el momento en que se efectúa el cálculo.....	362
10.1.4. Según el tiempo de observación .....	363
10.1.5. Otra clasificación.....	365
10.1.6. Métodos y ventajas y aplicaciones en Geomática .....	366
10.1.7. Precisión de posicionamiento .....	368
10.2. Planificación de una red estática.....	368
10.2.1. Selección de puntos .....	369
10.2.2. Ventanas de observación .....	369
10.2.3. Tiempos de observación .....	369
10.2.4. Organización.....	370
10.3. Tipos de receptores .....	371
10.3.1. Receptor GNSS topográficos, minería, construcción. Controladores y Antenas .....	373
Capítulo 11. Combinación de fase. Determinación de ambigüedades.....	381
11.1. Combinación de fase de portadora.....	381
11.1.1. Simples diferencias de fase.....	381
11.1.2. Dobles diferencias de fase .....	384
11.1.3. Triples diferencias de fase .....	385
11.2. Determinación de Ambigüedades .....	387
11.3. Resolución de ambigüedades con datos de dos frecuencias .....	388
11.4. Técnicas de búsqueda de ambigüedades.....	392
11.4.1. Resolución ambigüedades en movimiento (OTF) .....	392
11.4.2. Resolución rápida de ambigüedades.....	393
11.4.3. Filtro de búsqueda rápida de ambigüedades .....	393
11.4.4. Método de ajuste de decorrelación de ambigüedades.....	393

---

Capítulo 12. Cálculo y compensación de redes.....	395
12.1. Método general.....	395
12.2. Red ligada.....	398
12.2.1. Observaciones indirectas.....	399
12.2.2. Compensación de una red ligada. Resumen.....	405
12.3. Red libre.....	406
12.3.1. Solución mediante matriz de constreñimientos.....	407
12.3.2. Solución mediante matriz pseudoinversa.....	407
12.4. Iteraciones.....	408
12.5. Método Secuencial o solución progresiva. Ajustes coordinados.....	409
12.5.1. Adición y sustracción de observables.....	410
Capítulo 13. Posicionamiento absoluto y relativo.....	411
13.1. Cálculo de la posición absoluta de un punto por pseudodistancias de código.....	411
13.2. Posicionamiento absoluto con fase de la portadora.....	416
13.3. Posicionamiento relativo. Cálculo de líneas base.....	421
13.4. Ajuste de una red de vectores GNSS.....	424
13.5. Matriz varianza-covarianza. Correlación entre combinaciones de fases.....	425
13.5.1. Correlaciones de las simples diferencias.....	425
13.5.2. Correlaciones de las dobles diferencias.....	426
13.5.3. Correlaciones de las triples diferencias.....	428
Capítulo 14. Análisis estadístico de hipótesis y resultados. Fiabilidad y precisión. Solución de redes.....	429
14.1. Análisis estadístico de hipótesis y resultados.....	429
14.2. Pruebas estadísticas: consideraciones generales.....	431
14.3. Pruebas o test tras el ajuste.....	435
14.3.1. Pruebas o test estadísticos para validar el modelo.....	436
14.3.2. Test global $\chi^2$ .....	436
14.3.3. Prueba F.....	437

14.4. Estudio de la fiabilidad interna de la red. Detección de errores.....	439
14.4.1. Fiabilidad interna.....	439
14.4.2. Estudio de la fiabilidad externa (BNR Bias to Noise Ratio) .....	446
14.5. Precisión.....	447
14.5.1. Figuras de error.....	447
14.6. Particularización a redes topográficas GNSS. Esquema.....	450
14.7. Ajuste línea base.....	453
14.7.1. Parámetros estadísticos de calidad.....	454
14.8. Ajuste de la red.....	459
14.8.1. Ajuste Red Libre.....	461
14.8.2. Ajuste Red Ligada.....	462
14.8.3. Test de Tau.....	462
14.8.4. Fiabilidad externa.....	463
14.9. SOTWARE científico.....	464
14.10. Particularización a redes geodésicas GNSS.....	467
14.10.1. Fenómenos que producen variación de coordenadas, por alteración de la corteza terrestre.....	468
14.11. Cálculos de redes de alta precisión.....	469
14.11.1. Tectónica de placas.....	469
14.11.2. Factores producidos por las mareas terrestres sólidas, mareas oceánicas y mareas del polo.....	474
Capítulo 15. Correcciones diferenciales.....	483
15.1. GNSS diferencial.....	483
15.2. Cinemático en Tiempo real RTK.....	485
15.2.1. Solución de estación simple, antena más próxima.....	487
15.2.2. LADGNSS. Solución de Red RTK.....	489
15.2.3. Modelos de correcciones disponibles.....	490
15.2.4. Requisitos básicos para trabajo con RED RTK/NTRIP.....	491
15.2.5. Solución RTX Trimble xFill.....	492

15.3. Formatos de transmisión de datos GNSS .....	494
15.3.1. Formato RTCM. Radio Technical Comission for Maritime Service ...	495
15.3.2. Formato CMR y CMR+, CMRx.....	499
15.3.3. RTCA .....	499
15.4. El protocolo NTRIP.....	500
15.5. Soluciones o sistemas de correcciones diferenciales RTK.....	503
15.5.1. Solución de red RTK.....	503
15.5.2. Virtual Reference Station (VRS).....	506
15.5.3. FKP. Parámetros de corrección de área o planos .....	508
15.5.4. La solución MAC (Master Auxiliary Concept).....	510
15.5.5. MAX Master Auxiliary Corrections.....	511
15.5.6. I-MAX Individualized Master Auxiliary Corrections .....	512
15.5.7. Comparativa y soluciones RTK .....	513
15.5.8. Repetidor amplificador de señal .....	514
15.6. DGNSS de precisión, desde el espacio SBAS.....	515
15.6.1. OmniSTAR.....	515
15.6.2. Otros proveedores de correcciones diferenciales .....	516
15.7. EGNOS.....	519
15.8. GNSS y agricultura de precisión .....	522
<b>Capítulo 16. Redes de estaciones permanentes.....</b>	<b>529</b>
16.1. Red de estaciones permanentes. Redes GNSS actives.....	529
16.1.1. Objetivos y aplicaciones fundamentales de estas redes.....	530
16.1.2. Características básicas.....	531
16.2. Estructura o jerarquía de redes.....	532
16.3. Redes Internacionales .....	533
16.3.1. Red de estaciones GNSS del International GNSS Service.....	533
16.3.2. La red de estaciones permanentes de EUREF.....	535

16.4. Los centros de análisis y centros de datos de EUREF y del IGS. Productos y Servicios. ....	538
16.4.1. CORS-National Geodetic Survey (USA) .....	540
16.4.2. El proyecto MGEX (Multi-GNSS EXperiment) .....	541
16.4.3. La red CONGO (Cooperative Network for GIOVE Observations).....	542
16.5. Redes nacionales .....	544
16.6. Redes regionales o autonómicas en España .....	546
16.6.1. Red de estaciones de referencia GNSS de Valencia: red ERVA .....	549
16.7. Redes de otros organismos o instituciones oficiales de España.....	551
16.7.1. La red española DGPS para la navegación marítima.....	551
16.7.2. Redes instituciones privadas.....	551
Capítulo 17. Posicionamiento de Punto Preciso PPP.....	553
17.1. Fundamento teórico .....	553
17.1.1. Combinaciones de observables empleadas en PPP.....	555
17.1.2. Modelo lineal de observación en PPP .....	558
17.2. Métodos para la recuperación de ambigüedades enteras en PPP .....	561
17.2.1. Fractional Cycle Biases (FBC).....	562
17.2.2. Integer Recovery Clocks (IRC) .....	564
17.2.3. Otras aproximaciones .....	567
17.3. Distribución de correcciones para posicionamiento PPP en tiempo real .....	569
17.3.1. El concepto clásico “Observation Space Representation- OSR” .....	569
17.3.2. Concepto “State Space Representation” .....	570
17.3.3. Composición del vector de estado en la aproximación por SSR .....	571
17.3.4. Correcciones a la órbita del satélite en el concepto SSR.....	572
17.3.5. Alternativas en la generación del vector de estado SSR.....	579
17.3.6. Servicio RTS del IGS. ....	594

Capítulo 18. Altimetría por satélite .....	603
18.1. Introducción.....	603
18.2. Funcionamiento .....	606
18.2.1. Banda Ku (13.6 GHz).....	608
18.2.2. Banda C (5.3 GHz).....	608
18.2.3. Banda S (3.2 GHz) .....	608
18.2.4. Banda Ka (35 GHz).....	609
18.2.5. Altimetros de doble frecuencia.....	609
18.3. Satélites y misiones .....	609
18.4. TOPEX/Poseidon.....	610
18.5. Jason-1 .....	611
18.6. Jason-2.....	612
18.7. Jason-3 (2016) .....	615
18.8. SARAL/ALTIKA (2013).....	617
18.9. Cryosat (2010) .....	618
18.10. Sentinel 3 (2018) .....	620
18.10.1. Visión panoràmica.....	620
18.11. CFOSAT/ (2018).....	620
18.12. Futuras misiones .....	621
18.12.1. Swot (2021).....	621
18.12.2. Jason-CS / Sentinel-6 (2020).....	621
18.12.3. Sentinel-3 .....	621
Bibliografía .....	623
Acrónimos .....	625



# Capítulo 1

# Introducción

J. L. Berné Valero

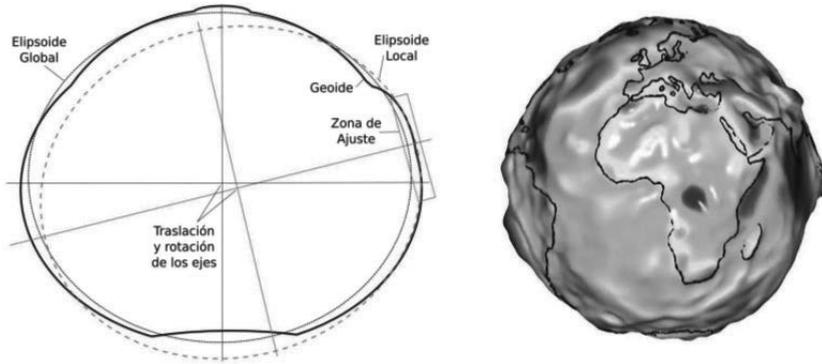
## 1.1. Definición de Geomática y Geodesia

En el siglo XXI surge un nuevo concepto provocado por el desarrollo tecnológico en el campo de las ciencias geográficas y geodésicas, la Geomática. Los cambios y avances provocados con las nuevas tecnologías TIC, con la era espacial, y con las nuevas telecomunicaciones, y surge un nuevo espacio profesional o experto ligado al término Geomática, también denominada tecnología geoespacial o ciencias geomáticas, es un término científico que está compuesto por dos ramas, "geo" (Tierra) y "mática" (informática), para explicar parte del conocimiento geográfico a través de tecnologías para adquirir, almacenar, procesar, medir, analizar, presentar, distribuir y difundir información geográfica referenciada y representa un conocimiento estratégico para la gestión sostenible del territorio (UAG, 2000). International Standards Organization la define como un campo que integra diversos medios utilizados para la gestión y adquisición de los datos espaciales necesarios para la producción y gestión de la información espacial.

A la Geodesia le corresponde el posicionamiento preciso sobre la Tierra, Helmert (1880) define la Geodesia como la ciencia de la medida y representación de la Tierra. Esta definición en la actualidad debe completarse con el estudio de su campo de gravedad, sus variaciones temporales y rotación.

Está estrechamente ligada con la Hidrología, la Glaciología, la Geología, las ciencias atmosféricas, la comprensión de la dinámica terrestre, el movimiento de las placas y el comportamiento global de la Tierra. Para sus mediciones utiliza gran variedad de técnicas

y sistemas, y su revolución reciente se debe a la aplicación de técnicas geoespaciales, como los sistemas GNSS, la navegación inercial, y técnicas gravimétricas modernas.



Fuente: NASA

**Figura 4. Geoide y Elipsoide**

La Tierra no es un cuerpo rígido homogéneo, está formada por una parte sólida, una líquida u oceánica y unos casquetes de hielo, y rodeada por una atmósfera. El centro de la Tierra es una mezcla de materiales viscosos y sólidos y los movimientos de rotación, traslación y fuerzas gravitatorias, la hacen un elemento vivo, cambiante, por ello su superficie está sujeta también a deformaciones producidas por los efectos de mareas terrestres, oceánicas y atmosféricas, como se muestra en la Figura 4.

Para estudiar su forma se acepta una figura geométrica de propiedades conocidas y desarrollables matemáticamente, y esta es el elipsoide, achatado por su revolución, por los polos. Para definir la componente  $z$  o altitud, el elipsoide no es una buena referencia. El agua de los océanos busca estar en equilibrio y por ello busca una superficie gravitatoria equipotencial, y por esta razón se toma como referencia la superficie del nivel medio de los mares, superficie equipotencial en el campo de la gravedad terrestre, denominado Geoide, y a esta altitud se le llama ortométrica.

Su campo de gravedad verifica la condición de potencial de gravedad  $W = W_0 = \text{cte}$ . El geoide y el elipsoide están relacionados por:

$$h = H + N$$

donde  $h$  es la altura elipsoidal de un punto respecto al elipsoide,  $H$  o altura ortométrica es la altura de un punto respecto al geoide, o nivel del mar y  $N$  es la ondulación del geoide, la altura del geoide respecto al elipsoide. En este caso  $h$  y  $N$  son perpendiculares al elipsoide, y  $H$  al geoide, sigue la línea de la plomada.

El estudio de la Geodesia puede realizarse con distintos métodos de trabajo y observables, y podemos distinguir: Geodesia geométrica y Geodesia dinámica.

Desde el punto de vista temático se puede establecer otra clasificación:

Geodesia geométrica o elipsoidal, Geodesia física, Geodesia tridimensional, Geodesia espacial y Geodesia cinemática.

**Geodesia geométrica:** estudia la geometría del elipsoide de revolución, es la determinación de la geometría, parámetros de tamaño y forma y posición del elipsoide.

**Geodesia dinámica o física, cinemática de las placas tectónicas:** estudia el campo de la gravedad terrestre y distribución de masas. Estudia el geoide como superficie equipotencial del campo de la gravedad de la Tierra, su diferencia con el elipsoide y sus variaciones en función del tiempo. El campo gravitatorio es afectado por muchos factores, densidad de masas, océanos, efectos gravitatorios, capa de hielo, y al estudio específico de estos temas se dedica la gravimetría.

**Geodesia tridimensional:** trata de la descripción geométrica y dimensional de la Tierra en un sistema de referencia tridimensional, su potencial y vector de gravedad terrestre: se puede prescindir del elipsoide.

El campo gravitatorio presenta variaciones globales, regionales y locales y pueden ser medidas con gran precisión y fechadas y esto da lugar a lo que algunos científicos les da el nombre de **Geodesia tetradimensional o cinemática**.

**Geodesia espacial o satelital:** estudia la Geodesia a partir de satélites y elementos espaciales, tratando la Geodesia cinemática, tridimensional y dinámica.

Hoy en día los métodos globales tratan de forma conjunta datos geométricos y dinámicos y esta es la llamada **Geodesia integrada**.

Los principales objetivos de la Geodesia son:

- Determinación de la geometría y figura de la Tierra, posicionamiento y navegación.
- Determinación de la gravedad terrestre, estudio del geoide, anomalías y variación temporal.
- Orientación de la Tierra. Precesión y nutación, tiempos UT, movimiento del polo y fenómenos geodinámicos.
- Estudio de la geometría superficial, modelo de elevación del nivel del mar.
- Aplicaciones en hidrología, atmósfera, vapor de agua, contenido TEC y cambio climático.

Las observaciones geodésicas miden y relacionan campos como la Geosfera (parte sólida), Hidrosfera (fluida), Atmósfera (gaseosa), Criósfera (glacial), y Biosfera (viva).

## **1.2. Geodesia espacial**

La aplicación de técnicas espaciales para la definición de marcos de referencia y estudio de la forma de la Tierra, de su campo de gravedad y su comportamiento ha creado un nuevo campo llamado Geodesia espacial, y con carácter más restringido Geodesia por satélites. La Geodesia espacial incluye la Geodesia satelital (GNSS, DORIS, GRACE,...) y técnicas de Interferometría de muy larga base VLBI, SLR, LLR.

La Geodesia espacial se basa en la recepción de señales electromagnéticas emitidas por dispositivos embarcados en satélites artificiales, o emitidas por cuásares extra galácticos, observaciones a la Luna y a las estrellas.

Los principales objetivos son la determinación de la figura de la Tierra, del campo de gravedad y el geode, y la medición de fenómenos geodinámicos, tales como la dinámica de la corteza terrestre, el movimiento del polo, o también análisis de fenómenos atmosféricos.

La Geodesia por satélites comenzó en el año 1958 después del lanzamiento del Sputnik (4 de octubre de 1957), un mes más tarde se envía el Sputnik 2, y en 1958 el primer satélite americano Vanguard I. La década de 1960 significó una gran apuesta y en 1964 se lanzan los primeros satélites Doppler Transit por EEUU, y luego los satélites del globo PAGEOS, el primer satélite geodésico ANNA-18, etc. En 1969 el Apolo 11 deposita en la Luna los reflectores laser y ese mismo año se mide la primera base por VLBI. En la década de los 80 se desarrolla el GPS por los EEUU, que permitirá la navegación precisa y el posicionamiento. Se establece el Sistema Geodésico Mundial WGS84. Avanzan en esta década las técnicas VLBI, GPS y el Sistema DORIS. En la década de los noventa se amplían las técnicas espaciales a temas medioambientales, con los satélites ERS, de la Agencia Europea del espacio ESA, en esta década aparecen los modelos de geopotenciales OSU 91 y EGM96. En el año 2000 se lanzan varios satélites para medir el campo de la gravedad de la Tierra como CHAMP, GRACE y GOCE.

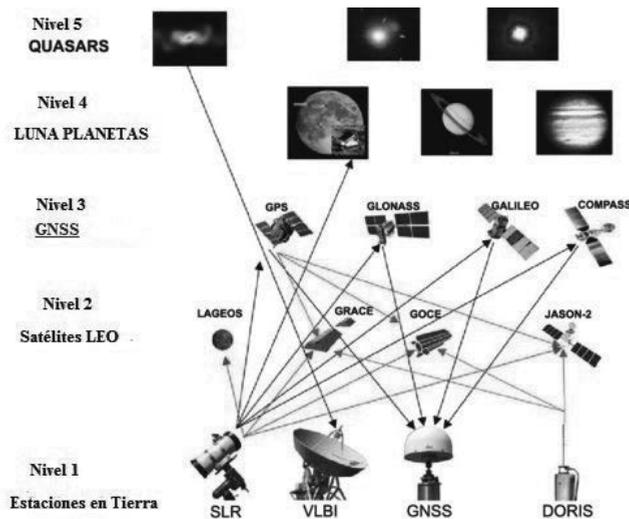
## **1.3. Sistemas de Observación Global GGOS**

Los sistemas de observación global integran las técnicas, modelos y métodos para el estudio geodésico y geodinámico y su influencia en el cambio global. Desde el punto de vista geodésico, las técnicas de Geodesia espacial y misiones satelitales son básicas para la determinación y control geodinámico, rotación de la Tierra y campo de la gravedad.

La infraestructura de GGOS consta de cinco niveles dependiendo de la distancia a la Tierra:

- Nivel 1. Infraestructura geodésica terrestre.
- Nivel 2. Las misiones de satélites LEO.
- Nivel 3. Los sistemas GNSS y SLR.
- Nivel 4. Misiones a la Luna LLR y planetas.
- Nivel 5. VLBI, objetos extragalácticos, cuásares.

La infraestructura combinada permite la determinación y el mantenimiento del marco de referencia geodésico global, y la determinación del campo de gravedad y la rotación de la Tierra. Las redes terrestres y los satélites de navegación GNSS son cruciales en el posicionamiento. En particular, permiten el monitoreo de volcanes, terremotos, regiones tectónicamente activas y áreas propensas a deslizamientos. Los satélites de la órbita terrestre baja (LEO) monitorean el nivel del mar, las capas de hielo, el almacenamiento de agua en la Tierra, el contenido de agua en la atmósfera, el movimiento de la superficie de alta resolución y las variaciones en el campo de gravedad de la Tierra. Estos últimos son causados, en gran medida, por el transporte masivo regional y global en el ciclo hidrológico.



Fuente: Jaroslav Bosy

Figura 5. Niveles observación espacio

Las aplicaciones y servicios de GGOS, además de los propios geodésicos son:

- Monitoreo y predicción de aumento del nivel del mar.
- Monitoreo de cambios en el volumen de hielo.
- Creación de mapas topográficos muy precisos.
- Evaluación de desastres naturales (volcanes, sismos).
- Meteorología.
- Agricultura de precisión.
- Navegación autónoma.
- Ciencias de la Tierra.

### **Técnicas de medición de Geodesia espacial**

Las técnicas para llevar a cabo la Geodesia espacial utilizan varios principios de medida, en general consiste en una estructura Tierra-espacio con un componente en Tierra de estaciones fijas desde las que se realiza un seguimiento al movimiento del satélite u objeto astronómico (Luna, cuásares...) con ondas electromagnéticas. Estas estaciones pueden ser pasivas, no emiten señal, solo las reciben desde los satélites o cuásares (GNSS, VLBI...) o pueden ser activas, emiten y reciben señal (SLR, LLR, DORIS...). Es decir, con fines geodésicos se utilizan dos tipos de satélites, los llamados pasivos, que no llevan ningún emisor de señal propia, se apoyan en llevar elementos reflectantes o reflexión, caso del SLR; y los satélites activos, emiten pulsos de luz o microondas, incluso alguno de estos satélites lleva prismas retrorreflectores pasivos.

Otra clasificación puede hacerse de acuerdo al centro de emisión y se agrupan en:

- Técnicas estación-satélite, se realizan observaciones a satélites desde las estaciones en la Tierra. Ejemplo: LASER.
- Técnicas satélite-estación, los satélites emiten señales recibidas en tiempo. Ejemplo: GNSS.
- Técnicas satélite-satélite, caracterizado por la interconexión entre satélites. Ejemplo: satélites utilizados para detectar variaciones en el campo de la gravedad terrestre GRACE.

Las cuatro técnicas fundamentales en Geodesia espacial para trabajar con precisión centimétrica son:

- GNSS. Sistemas Satelitales de Navegación Global.
- SLR. Satellite Laser Ranging.
- VLBI. Very Long Baseline Interferometry.
- DORIS. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite.

Existen otras técnicas para altimetría, como radares altimétricos (Topex, ERS, Jason) y Altimetría Laser (LIDAR), técnicas de Geofísica especial como el radar de apertura sintética interferométrico InSAR, y técnicas de medidas gravimétricas (GOCE, GRACE).

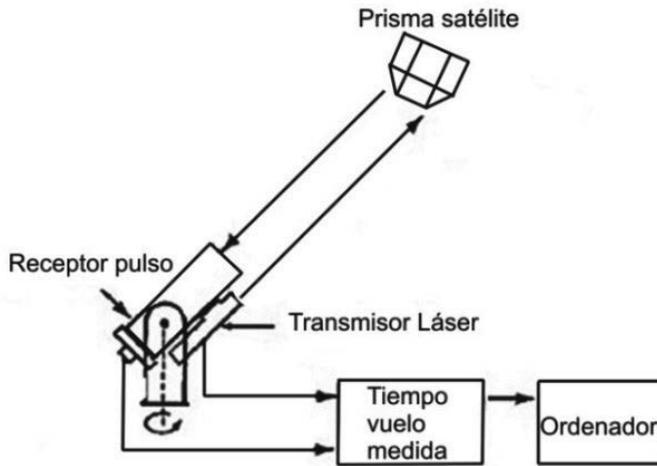
#### 1.4. SLR Satellite Laser Ranging

Es un sistema de observación de distancia por rayos laser. Los satélites utilizados son pasivos, son simples esferas recubiertas de prismas de reflexión total, como los usados con las estaciones totales. La estación está constituida por un potente laser pulsante, un reloj atómico, un contador, un receptor fotodetector, un ordenador y un sistema auxiliar. El Satellite Laser Ranging (SLR) es un método muy preciso de medición de distancias realizado mediante la emisión de pulsos de luz láser a satélites de acuerdo con el principio de pulso-eco. El proceso consiste en enviar un pulso muy corto y potente (destello) de luz láser mediante un telescopio láser a los retroreflectores de los satélites, como se muestra en la Figura 6. Estos retroreflectores son "espejos" especiales con la capacidad de reflejar la luz en la misma dirección de incidencia. Entonces el haz de luz viaja hasta el satélite, y regresa hacia el receptor del telescopio. En la Tabla 1 se muestran los componentes del sistema SLR.

**Tabla 1. Componentes del SLR**

<b>Segmento espacial</b>	Satélites equipados con retroreflectores "corner cube", LAGEOS, GEOS, altura 5900 km
<b>Segmento Tierra</b>	Transmisor de laser de corto-pulso
<b>Sistema de medición, precisión cm</b>	Tiempo de vuelo de ida y vuelta al satélite Laser YAG de Nd (cristal de Yrrio Aluminio Granate con iones de neodimio)

Empleando un reloj atómico se mide el tiempo de vuelo del pulso láser en su viaje de ida y vuelta. Con este tiempo de vuelo, y conocida la velocidad de la luz, es posible calcular la distancia entre el satélite y el telescopio. Este sistema provee mediciones instantáneas con un nivel de precisión centimétrica (IERS).



**Figura 6. Medida SLR**

Para aplicaciones de IERS, los satélites más utilizados son los satélites esféricos densos conocidos como Lageos-1 (lanzamiento 1976) y Lageos-2 (lanzamiento de 1992). Ahora es posible medir a los satélites Lageos con una precisión de menos de 1 cm de un pulso de láser. Los satélites LAGEOS tienen un cuerpo esférico de latón recubierto de aluminio. Estos materiales fueron elegidos para reducir el efecto del campo magnético terrestre sobre el satélite. Tienen un diámetro de 60 centímetros y una masa aproximada de 405 kilogramos. Su exterior está cubierto con 426 retrorreflectores, dándoles el aspecto de una pelota de golf gigante, véase Figura 7. Estos satélites no tienen a bordo ningún sensor o dispositivo electrónico ni sistemas de control de altitud. Se mueven en órbita libre alrededor de la Tierra, a una altitud aproximada de 5900 km, por encima de la órbita baja terrestre y por debajo de la órbita geosincrónica. Su periodicidad es de aproximadamente 204 minutos, esto significa que pasan por un mismo punto cada 3 horas 24 minutos.

El conjunto de estaciones y red SLR está organizado por el International Laser Ranging Service. La misión principal del ILRS es apoyar, a través de Satélite Laser Ranging (SLR) y datos Lunar Laser Ranging (LLR) así como productos relacionados, las actividades de investigación Geodésica y Geofísica.



**Figura 7. Retrorreflector**

La red de estaciones SLR está formada por 38 estaciones en el mundo, y a ella pertenece la estación de San Fernando (Cádiz-España), que puede verse en la Figura 8.



Fuente: ROA, Cádiz

**Figura 8. Observatorio San Fernando**

El SLR es una técnica fundamental para la materialización del ITRS, contribuye a la definición del Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF) y es la técnica que define mejor el centro de masas de la Tierra, con exactitud centimétrica, y tiene gran peso en la materialización de la escala del marco de referencia. Monitorea la rotación de la Tierra y el movimiento polar sirve para proveer de la relación del Marco de Referencia Internacional Celeste (CRF) y se utiliza para modelar la variación temporal y

espacial de la gravedad de la Tierra. Tiene aplicación en estudios de tectónica de placas y deformaciones.

Las mediciones de SLR requieren una corrección para el componente seco de la Troposfera; así, las estaciones de SLR miden la presión atmosférica, temperatura y humedad relativa para calcular esta corrección. Desde 1976, más de 100 estaciones han obtenido medidas SLR Lageos-1. Se han obtenido coordenadas con una precisión mejor que 2 cm para la mayoría de las estaciones y se han obtenido las velocidades de unas 50 estaciones.

Varios satélites de NAVSTAR (GPS), y la totalidad de los GALILEO están equipados con retrorreflectores láser. Así mismo los nuevos sistemas de navegación GNSS incorporan retrorreflectores láser, así lo han hecho IRNSS, BeiDou y QZSS.

La SLR es una técnica precisa para determinar la posición geocéntrica de un satélite de la Tierra, que permite la calibración precisa de los altímetros de radar y la separación de la deriva de la instrumentación a largo plazo de los cambios seculares en la topografía oceánica. La capacidad de la SLR para medir las variaciones temporales en el campo de gravedad de la Tierra y para monitorear el movimiento de una red global de estaciones con respecto al geocentro, junto con la capacidad de monitorear el movimiento vertical en un sistema absoluto, la hace única para el modelado y la evaluación a largo plazo del cambio climático.

Algunos de los resultados científicos derivados de los productos SLR y LLR incluyen:

- Detección y monitoreo del movimiento de las placas tectónicas, deformación de la corteza, rotación de la Tierra y movimiento polar.
- Modelización de las variaciones espaciales y temporales del campo gravitatorio de la Tierra.
- Determinación de mareas oceánicas a escala de cuenca.
- Monitoreo de variaciones a nivel milimétrico en la ubicación del centro de masas del sistema total de la Tierra (Tierra-atmósfera-atmósfera-océanos sólidos).
- Establecimiento y mantenimiento del Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS).
- Detección y seguimiento de rebotes y hundimientos post-glaciales.

Además, la SLR proporciona una determinación de órbita precisa para misiones de altímetros de radar a bordo de vehículos espaciales que trazan un mapa de la superficie oceánica (que se utilizan para modelar la circulación oceánica global), para trazar cambios volumétricos en las masas de hielo continental y para la topografía terrestre. Proporciona un medio para la transferencia de tiempo global por debajo de los nanosegundos, y una base para pruebas especiales de la Teoría de la Relatividad General.

Un caso similar es **LLR, LUNAR LASER RANGING**, las misiones Apolo 11 (1973), 14 y 15 dejaron retrorreflectores sobre la Luna por parte de EEUU, y también los rusos en el programa Lunakhod. La técnica LLR puede materializar el sistema de referencia con errores de algunos centímetros (Boucher, 1998).

### 1.5. VLBI Very long Baseline Interferometry

VLBI es una técnica geométrica: mide la diferencia de tiempo entre la llegada a dos antenas terrestres de un frente de onda de radio emitido por un cuásar distante. Utilizando un gran número de mediciones de diferencia de tiempo de muchos cuásares observados con una red global de antenas, VLBI determina el marco de referencia de inercia definido por los cuásares y simultáneamente las posiciones precisas de las antenas. Debido a que las mediciones de la diferencia de tiempo son precisas a unos pocos picosegundos, VLBI determina las posiciones relativas de las antenas a unos pocos milímetros y las posiciones del cuásar a fracciones de miliar-segundos, dado que las antenas están fijadas a la Tierra.

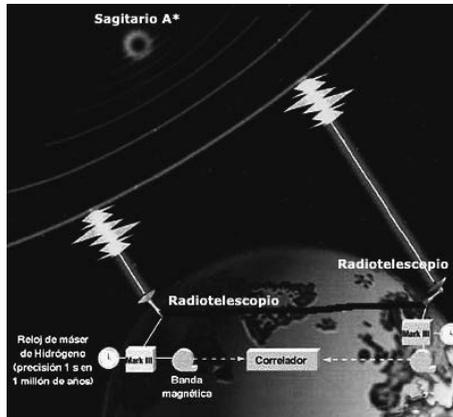
Un cuásar es una fuente de radiación quasi-estelar, es una enérgica galaxia con un núcleo galáctico activo, son muy brillantes y fueron identificados en 1950. Son los objetos más potentes del universo. Hay más de 100000 cuásares y están a millones de años luz de la Tierra. Pueden observarse en muchas partes del espectro: ondas de radio, infrarrojos, ultravioleta, rayos x. Los componentes de VLBI se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2. Componentes del VLBI**

<b>Segmento espacial</b>	Cuásares (frec. microondas) planetas, estrellas, galaxias
<b>Segmento terrestre</b>	Radiotelescopios, equipados con receptores de banda ancha
<b>Sistema medición</b>	La diferencia de tiempo de llegada del frente de onda radial emitido por un cuásar a dos antenas de Tierra

Un interferómetro es un conjunto de 2 o más antenas conectadas entre sí que observan simultáneamente una fuente astronómica, como se muestra en la Figura 9. Las observaciones a cada objeto se realizan mediante la observación simultánea de dos radiotelescopios y en la misma banda de frecuencia. Estas estaciones suelen estar separadas miles de km, el receptor convierte la señal de radiofrecuencia captada a una frecuencia intermedia, esta información viene con unas marcas temporales y luego se procede al tratamiento digital, la información se almacena y se procesa en el correlador de ambas estaciones. Las observaciones suelen durar 24 horas, y se obtienen precisiones del orden de 1 mm en horizontal y 3 mm en vertical. En la actualidad las posiciones de los puntos se miden varias veces al año por las más de 40 antenas distribuidas globalmente. El patrón de tiempos empleados es atómico y para ello utilizan máser de hidrógeno. El sistema VLBI mide el vector entre los centros radioeléctricos de dos radiotelescopios, utilizan la banda S (2-4 GHz) y la X (8-12 GHz).

Esta técnica es capaz de medir todos los componentes de la orientación de la Tierra con precisión y de forma continua.



Fuente: IGN

**Figura 9. VLBI**

El Servicio Internacional de VLBI (IVS) fue establecido en 1999 por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG). IVS es una colaboración internacional de organizaciones que operan o apoyan la Interferometría de muy larga base en sus aplicaciones a la Geodesia y Astrometría.

Existen dos grandes organizaciones mundiales de VLBI: La EVN European VLBI Network y la VLBA Very Long Baseline Array. La red de observatorios está formada por más de 40 organizaciones distribuidas en 17 países, que se puede consultar en <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/ns-map.html>, en España existe un sistema de antenas en Robledo de Chavela, provincia de Madrid y en el Observatorio de Yebes (Guadalajara).

El estudio continuo de la rotación de la Tierra requiere del empleo conjunto de observaciones VLBI y de técnicas con satélites. El VLBI proporciona la referencia absoluta para la determinación del tiempo universal, precesión y nutación. Las técnicas con satélites (GPS, SLR, DORIS...) proporcionan la interpolación diaria y la predicción de corto periodo del tiempo universal, basada en las observaciones altamente precisas, pero menos frecuentes, del VLBI; también proporcionan valores diarios del movimiento del polo.

El marco de referencia celestial está definido por VLBI. La Unión Astronómica Internacional ha adoptado más de 3400 fuentes de radio extragalácticas (en su mayoría cuásares) utilizadas por VLBI como los objetos definitorios del marco de referencia celestial. Los objetos extragalácticos forman un verdadero marco de referencia inercial porque están a distancias tan grandes que sus movimientos a través del cielo son indetectables. Las posiciones de las estrellas en nuestra galaxia ahora están vinculadas a

**Para seguir leyendo haga click aquí**