



**mr**  
manual de referencia

INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRAFÍA Y CONSTRUCCIÓN

# **GNSS GEODESIA ESPACIAL Y GEOMÁTICA**

José Luis Berné Valero | Natalia Garrido Villén | Raquel Capilla Roma



INGENIERÍA CIVIL,  
TOPOGRAFÍA Y CONSTRUCCIÓN

---

# **GNSS**

## **Geodesia espacial y Geomática**

---

José Luis Berné Valero  
Natalia Garrido Villén  
Raquel Capilla Roma

*Colección Manual de Referencia, serie Ingeniería Civil*

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados mediante el sistema doble ciego, siguiendo el procedimiento que se recoge en [http://tiny.cc/Evaluacion\\_Obras](http://tiny.cc/Evaluacion_Obras)

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Berne Valero, Jose Luis; Garrido Villén, Natalia; Capilla Roma, Raquel (2023). *GNSS. Geodesia espacial y Geomática*. edUPV.

© José Luis Berné Valero  
Natalia Garrido Villén  
Raquel Capilla Roma

© 2023, edUPV  
Venta: [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.:0445\_11\_01\_01

ISBN: 978-84-1396-072-2  
DL: V-322-2023

Imprime: La Imprenta C G

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

edUPV se compromete con la ecoimpresión y utiliza papeles de proveedores que cumplen con los estándares de sostenibilidad medioambiental <https://editorialupv.webs.upv.es/compromiso-medioambiental/>

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)

# Agradecimientos

Agradezco la colaboración de la profesora doctora Natalia Garrido, con la que compartimos varias asignaturas, su colaboración y generosidad en la corrección con todo referido con el manejo de software GNSS y la doctora ingeniera del Instituto Cartográfico Valenciano Raquel Capilla excelente geodesta, experta en Gns diferencial y PPP y responsable durante mucho tiempo de las redes DGNSS del ICV, así como las sugerencias que anualmente nos realizan los alumnos

Este libro se dedica a nuestras familias por su generosidad y afecto continuo especialmente a mis hijos, a los donantes de órganos y a la prosa de mi 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 a todos que me posibilitaron una nueva oportunidad en la vida.

Valencia, febrero 2023

José Luis Berné Valero



# Prólogo

**Marcelino Valdés Pérez de Vargas**

Director de infraestructuras geodésicas del Instituto Geográfico Nacional

Presidente de la Sección de la Geodesia de Comisión Española  
de Geodesia y Geofísica

Los sistemas por satélite de navegación global, más conocidos por sus siglas en inglés GNSS, están suponiendo otro nuevo y asombroso impulso en la inagotable evolución humana de manos del desarrollo tecnológico. Este impulso tiene su génesis en otros logros anteriores y con toda seguridad será el fundamento de nuevos e insospechados logros que no podemos aun ni imaginar.

Para que existan los GNSS han tenido que evolucionar diferentes campos sin los que no hubiera sido posible. Me refiero a los avances en la navegación, en la medición del tiempo y la distancia y los que corresponden al espacio con los satélites artificiales. No podemos entender como hemos llegado a los actuales GNSS sin rememorar las mejoras en la navegación y el posicionamiento que han dado a luz a variados desarrollos tecnológicos a lo largo de la historia como son el gnomon, el sextante, la brújula, el reloj de Harrison o la radionavegación. Además, ha sido necesaria la continua mejora en la capacidad de medir la distancia y el tiempo que tienen actualmente su máxima expresión en las aplicaciones de la interferometría o en el uso de los relojes atómicos. Pero claro, todo esto no hubiera sido posible sin los inestimables avances en la carrera espacial con sus grandes hitos en este contexto, como son: el lanzamiento del Sputnik I en el año 1957, el comienzo del primero de los GNSS, el sistema Transit, en el año 1964, el alumbramiento del sistema GPS de finales de los años setenta del pasado siglo, el desarrollo del por entonces soviético sistema GLONASS de los años ochenta del siglo XX, la aparición de nuestro propio sistema, el europeo Galileo, a principios de este siglo, o finalmente la existencia, hoy en día, de otros GNSS como son el chino Beidou, el indio IRNSS o el japonés QZSS. Pero todos estos no son más que algunos de los hitos principales que jalonan un mundo en continua evolución y en el que para estar adecuadamente actualizado se necesitan nuevas revisiones cada poco tiempo.

Por otro lado, las repercusiones del GNSS están siendo cada vez más importantes en innumerables campos que afectan cada vez más directamente a nuestro día a día. Si bien se concibieron con una aplicación principalmente militar, procurando una adecuada navegación con la obtención de posiciones casi instantáneas en cualquier lugar del globo, sus posibilidades fueron aumentando, permitiendo posicionamientos y obtención de tiempo con una gran precisión que ha provocado su aplicación a otros campos como es el de la Geodesia o la Topografía de precisión. Estas nuevas posibilidades se materializan en nuevas aplicaciones que afectan a campos tan dispares como la Geofísica, Meteorología, vehículos autónomos, informática, banca, el comercio o la agricultura y que se van incrementando cada día.

A la vista de lo expuesto vemos que para entender el funcionamiento y las aplicaciones del GNSS y así poder transmitirlo adecuadamente, como pretende esta obra, sería necesaria un observador ideal que haya tenido una posición privilegiada que le haya permitido aplicarlos de forma empírica en la mayor cantidad de campos posibles, pero también es necesario que los haya utilizado durante la mayor cantidad de tiempo posible para, una vez asimilada esa continua evolución, poder comunicar con acierto que son los GNSS explicando de dónde vienen para poder prever como progresarán y que nuevas aplicaciones nos brindarán mañana. Pues bien, el autor principal de esta obra es de las pocas personas que podemos encontrar en nuestro país que se acerque a ser ese observador ideal. Desde su posición de profesor e investigador y actualmente catedrático en la Universitat Politècnica de València desde el siglo pasado, ocupando diferentes cargos algunos de ellos de la máxima responsabilidad, y siempre implicado a campos como son la Topografía, Geodesia, Cartografía o Geomática, ha tenido la ocasión de intervenir en numerosísimos trabajos relacionados con el contenido de este libro. Trabajos que han dado su fruto con la realización de un grandísimo número de proyectos, patentes, contratos de investigación, publicaciones en congresos, artículos de revistas, capítulos de publicaciones y libros. Yo mismo soy testigo directo de la dedicación y capacidad de comunicación de este profesor gracias a haberlo disfrutado durante mis añorados años en la Universidad. De tal forma que creo sería muy difícil encontrar a alguien con un mejor punto de vista para emprender la inmensa tarea que supone realizar un libro que recopile, con un objetivo divulgativo, toda la información más relevante sobre GNSS. Información necesaria, sobre todo para los que se acerquen a su conocimiento desde un punto de vista más profesional o académico. La prueba de lo apropiado del autor principal para esta obra lo tenemos en el resultado, porque el libro del que escribo no ha nacido de cero, sino que es heredero de las continuas evoluciones que ha necesitado y seguramente necesitará para adaptarse a la actualidad de cada momento. Pero una obra tan ambiciosa, para ser completa necesita de la colaboración de otros expertos. Al menos, como nos encontramos en esta obra, en algunos de los capítulos que ya sea por su complejidad o actualidad se vean reforzados por esta colaboración. En este caso nos encontramos con dos colaboradoras que aportan su experiencia tanto en el profesorado y la investigación en la UPV como en el campo de las redes geodésicas tanto activas como pasivas desde la administración autonómica.

Desde el primer predecesor de esta obra, *GNSS. GPS: Fundamentos y Aplicaciones en Geomática* del año 2014, a su heredero *GNSS: GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU. Fundamentos y Métodos de Posicionamiento* del año 2019, en el que ya se incluían y modificaban diversos capítulos para adaptarse a la rapidísima evolución del GNSS, ha sido necesario esperar apenas algunos años más para que se haya necesitado añadir nuevos capítulos y ampliar algunos de los existentes en este último continuador de la saga. Muy seguramente, si el destino lo permite y deseo que así sea, serán necesarios nuevas ampliaciones para adaptarse al continuo reto de innovación a los que está sometida una técnica tan compleja y sometida a continua evolución como es el GNSS. El libro, de forma acertada y sin perder de vista su objetivo divulgativo, nos propone un viaje desde lo fundamental a lo más concreto. De manera que comienza con un enfoque sobre la enorme importancia que suponen los GNSS en el mundo de la geodesia que junto con otras técnicas como el VLBI o el SLR nos permiten la definición de los marcos de referencia terrestres que materializan los sistemas de referencia de coordenadas que, como no, también son tratados con profundidad. A continuación, se detallan las características de las órbitas y señales de los satélites para más tarde identificar las principales características de cada uno de los actuales GNSS (Galileo, GPS, GLONASS, ...). Más tarde se analizan cuáles son los observables que permiten la resolución de la posición y el tiempo sin olvidar los errores y perturbaciones que les afectan, sobre todo las que afectan a la señal en su paso por las distintas capas de la atmósfera. Posteriormente se identifican los distintos métodos de observación y posicionamiento y qué algoritmos usaremos, en el caso del posicionamiento más preciso, para resolver las ambigüedades de fase inicial de las señales recibidas. A partir de este momento el libro se centra con más detalles en las aplicaciones más complejas del GNSS como son el cálculo de redes geodésicas o topográficas de precisión. Para ello se repasan los modelos matemáticos y estadísticos que fundamentan el cálculo de posiciones en estas redes particularizando para el caso de observaciones GNSS. Seguidamente, y como ha ocurrido en la evolución real del GNSS, se detallan los métodos que aparecieron posteriormente y que han permitido los cálculos más precisos en tiempo casi-real aprovechando los conceptos de los capítulos anteriores pero aplicados mediante emisiones permanentes de correcciones diferenciales que permiten ese posicionamiento preciso de forma casi instantánea. Estos servicios de emisión de correcciones se basan en la existencia de redes de estaciones que permanentemente observan los satélites y emiten las correcciones, por lo que acertadamente se analizan cuáles son las actualmente existentes y sus principales características. Después se distingue un algoritmo de resolución del modelo matemático que ha ganado notoriedad posteriormente y que por su sencillez y posibilidades de aplicación en tiempo casi real es cada vez más utilizado, el llamado PPP. Adicionalmente, se nos ofrece un capítulo donde se detalla el concepto de altimetría por satélite y las misiones más importantes, su relación con los GNSS radica en la complementariedad de ambas técnicas para el conocimiento de la superficie terrestre. A final nos encontramos con un capítulo con un alcance más práctico sobre las posibilidades de aprovechamiento de los actuales teléfonos inteligentes con las últimas novedades que nos ofrece la tecnología GNSS.

En definitiva, este libro puede ser considerado un “Manual del GNSS” que sigue la estela de otros como *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, pero que sin pretender cubrir todos los temas al nivel más complejo, selecciona los más importantes y los hace accesibles desde un punto de vista didáctico y divulgativo y con un acertado hilo argumental que lo hace ideal para estudiantes, profesores de ingeniería y profesionales de los variados sectores relacionados con los GNSS, como no podía ser de otra forma a la vista del perfil divulgativo del autor. Otra ventaja es que sin duda nos encontramos ante el más actual y pormenorizado libro divulgativo sobre GNSS escrito en español hasta el momento, lo que multiplica el número de personas que, sin duda, se servirán de él.

Madrid febrero 2023

# Prólogo autor

J. L. Berné Valero

Nuestra sociedad ya depende, en gran medida, de la disponibilidad de servicios de posicionamiento, navegación y cronometraje (PNT) generados por los sistemas GNSS de la misma manera que dependemos de la electricidad y las telecomunicaciones. La geolocalización-posicionamiento-navegación es un bien importantísimo en nuestra sociedad del bienestar y de la sostenibilidad.

El Sistema de Posicionamiento Global entre los GPS y más ampliamente los Sistemas de Navegación por Satélite GNSS es la principal fuente de Posicionamiento, Navegación y Temporización (PNT) para más de seis mil millones de usuarios en todo el mundo.

A medida que los mercados globales entran en la Cuarta Revolución Industrial, la industria geoespacial, de repente se encuentra alineada con el mercado agregando dimensión espacial y contexto de ubicación a la infraestructura digital, sistemas interconectados y procesos de negocio. La integración del mercado geoespacial ha creado una gran demanda de contenido geoespacial y soluciones en gobiernos, empresas y consumidores.

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 Altimetría satelital y utilización de los teléfonos inteligentes Smartphone como receptores GNSS.

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, 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

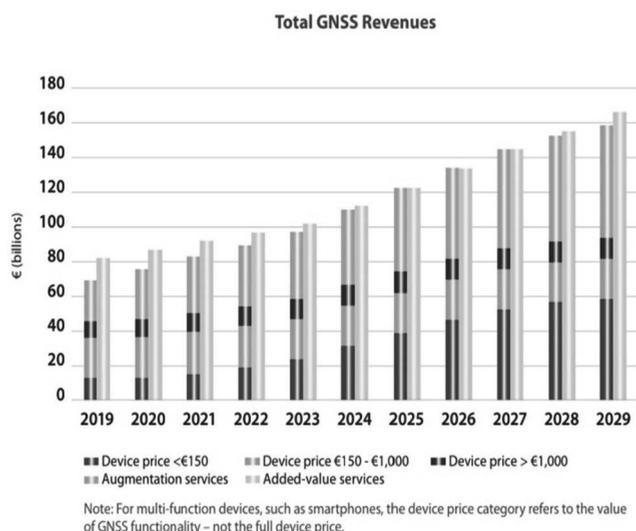
exclusivo de Geospatial Media and Communications, segmenta ampliamente el ecosistema de la tecnología geoespacial en cuatro categorías, GNSS y Posicionamiento, GIS y Análisis Espaciales, Observación de la Tierra y Escaneo 3D.

*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).*

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 con 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**

Según el informe de **EUSPA 2022** “Los envíos globales anuales de receptores GNSS crecerán continuamente durante la próxima década (de 1800 millones de unidades en 2021 a 2500 millones de unidades en 2031). La gran mayoría están asociados al Consumo, Segmento de Soluciones, Turismo y Salud que aporta aproximadamente el 92% de todos los envíos anuales globales gracias a la enorme cantidad de teléfonos inteligentes y dispositivos portátiles que se venden anualmente. En paralelo, la creciente adopción e integración de los sistemas en el vehículo entre los nuevos envíos de autónomos 9% en 2021 al 12% en 2031. Mirando otros segmentos, Aviación y Drones es un mercado importante se espera que crezca de 42 millones de unidades en 2021 a 49 millones en 2031. El segmento Marítimo es el segundo más grande mercado en 2021, pero ve su participación global del 17% en 2021 (correspondiente a 11 millones de unidades) caer al 16% (17 m en 2031), mientras que Agricultura se convierte en el segundo mercado más grande alcanzando una participación del 18% en 2031 (aproximadamente 20 millones de unidades en 2031, frente a menos de 5 millones de unidades en 2021).

Las soluciones para carreteras y consumidores dominan todos los demás segmentos del mercado en términos de ingresos acumulados con un total combinado del 90% para el período de pronóstico 2021-2031. En el sector de Carreteras, la mayoría de los ingresos son generados por los dispositivos utilizados para la navegación (In-Vehicle Systems (IVS)), asistencia de emergencia, ADAS, así como aplicaciones de gestión de flotas (incluyendo seguros telemática), mientras que los ingresos de Consumer Solutions provienen principalmente de los ingresos de datos de los teléfonos inteligentes y tabletas que utilizan servicios y aplicaciones basados en la ubicación. Centrándonos en el resto de los ingresos, más del 70% de estos serán generados por Agricultura (37%), Desarrollo Urbano (26%) e Infraestructura (20%). Los ingresos en agricultura se generan principalmente de servicios comerciales de aumento y equipos de dirección automática, mientras que las fuentes primarias de los ingresos en Urbanismo e Infraestructura están vinculados a las aplicaciones de la Geomática (cartografía y agrimensura, operaciones de construcción y selección o monitoreo del sitio).”

“La industria geoespacial global es una de las industrias de más rápido crecimiento en la actualidad, y se está transformando de ser una industria impulsada por productos a una industria impulsada por soluciones, con integración en las principales tecnologías de TI e ingeniería.

Para 2030, se espera que los ingresos de este mercado sean más de \$ 1.4 billones, debido a reformas estratégicas de políticas públicas, estrategias de aceleración de la industria e innovaciones en el paradigma del metaverso y el gemelo digital GeoBuiz-22 de Geospatial World.

Global Geospatial Industry Outlook Report elabora ampliamente sobre tecnologías futuristas y dinámicas comerciales que se espera que impacten las industrias geoespaciales y afines en un futuro cercano. La matriz de innovación para impactar es definitivamente algo que interesaría a los líderes de la industria geoespacial, ya que implica información relacionada con la posición relativa de los principales competidores del mercado dentro del espacio geoespacial”, dice la Sra. Ananya Narain, directora de GW Consulting, Geospatial World.

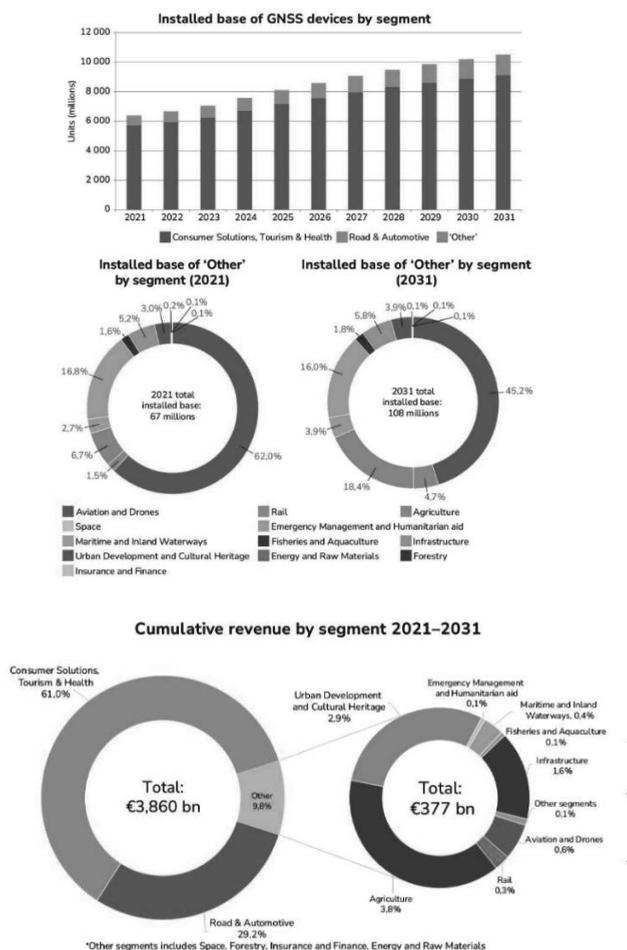


Figura 2. Porcentaje de mercado por servicios Fuente EUSPA

Las aplicaciones de GNSS ocupa todo el mercado y toda vida socioeconómica productiva y social, según el informe EUSPA estas son los campos de aplicación GNSS.

**Agricultura:** las nuevas tecnologías están empujando al sector agrícola hacia nuevas fronteras GNSS se considera un impulsor y facilitador clave para estas evoluciones, que van desde la tradicional aplicación agrícola para Internet de las cosas, cadena de bloques, tecnología agropecuaria y cadena de valor administración. Los wearables para ganado habilitados para GNSS están emergiendo como una tendencia emocionante que está mejorando el bienestar animal.

**Aviación y drones:** el tráfico aéreo mundial se vio muy afectado debido a la COVID-19: aerolíneas respondió con la consolidación de las flotas y priorizó el retiro de aeronaves más antiguas. Mientras tanto, la evolución de los estándares en navegación y vigilancia sigue adelante, mejorado por la creciente demanda de operaciones de drones cada vez más sofisticadas.

**Biodiversidad, ecosistemas y capital natural** – en el dominio de la biodiversidad, los ecosistemas y capital natural, las balizas GNSS se utilizan para geolocalizar animales con el fin de seguimiento de migraciones, hábitats y comportamientos. Estos son cada vez más precisos y están surgiendo aplicaciones adicionales para la biodiversidad (por ejemplo, cartografía botánica).

**Servicios climáticos:** el GNSS tiene una aplicación limitada pero importante en los servicios climáticos. La tecnología es compatible con una variedad de aplicaciones geodésicas que miden propiedades de la Tierra (campo magnético, atmósfera) con impacto directo el clima de la Tierra. Se espera que el GNSS desempeñe un papel cada vez más importante en el creciente mercado del cambio climático.

**Consumer Solutions, Tourism and Health:** GNSS encuentra un uso cada vez mayor para facilitar nuestra vida diaria. Desde aplicaciones sensibles al contexto que monitorean los tiempos de visita pico hasta entregas sin contacto y aplicaciones de fitness personal (impulsadas por dispositivos portátiles), navegación e información de posicionamiento juegan un papel fundamental.

**Manejo de emergencias y ayuda humanitaria** – se estima que salvará 2000 vidas al año, el nuevo sistema MEOSAR del programa COSPAS-SARSAT basado en GNSS se basa en el uso adecuado de las balizas de búsqueda y salvamento habilitadas para GNSS. En el campo, GNSS es una herramienta valiosa para coordinar la respuesta de emergencia y la ayuda humanitaria.

**Energía y materias primas** – monitorización y gestión de redes eléctricas dependen en gran medida de la temporización y la sincronización GNSS, lo que permite el equilibrio entre el suministro y la demanda y garantizar operaciones seguras. En el ámbito de las materias primas, el aumento la adopción de GNSS aumentado apoya la selección, planificación y monitoreo del sitio, así como actividades de vigilancia minera y orientación de maquinaria minera.

**Pesca y acuicultura:** el GNSS juega un papel vital para la eficiencia y eficacia seguimiento de las actividades pesqueras a través de aplicaciones como VMS y AIS. como el crece el enfoque en la sostenibilidad de estas actividades, disminuyen las tierras agrícolas y la demanda aumenta, las propias aplicaciones GNSS están experimentando una mayor demanda

**Silvicultura:** el GNSS se está convirtiendo en una herramienta extremadamente valiosa para monitorear y mantener la sostenibilidad de nuestros bosques. Además de la gestión forestal de precisión, una clave emergente, la tendencia es el uso de UAV habilitados

para GNSS dispositivos de seguimiento que ayudan a garantizar la salud de nuestros árboles y la eficiencia de nuestras cadenas de suministro de madera.

**Infraestructura** – GNSS contribuye al buen funcionamiento de las operaciones de infraestructuras. Permite una finalización segura y a tiempo de los trabajos de construcción a través de la provisión de servicios de alta precisión y soporta la sincronización de redes de telecomunicaciones. Con la transición hacia 5G, se espera la función de temporización y sincronización GNSS desempeñe un papel cada vez más crítico en las operaciones de la red de telecomunicaciones.

**Seguros y finanzas:** el mundo financiero depende de la temporización y sincronización GNSS para el sellado de tiempo exacto de las transacciones financieras. Las aseguradoras, por su parte, están recurriendo a los UAV habilitados para GNSS para una evaluación de reclamos más precisa y rápida.

**Vías navegables marítimas y fluviales:** GNSS ha demostrado su versatilidad al proporcionar información sobre los datos, para monitorear las actividades mundiales de envío y puertos durante la pandemia. Mirando hacia el futuro, se espera que la automatización y 5G traigan avances tecnológicos en puertos, GNSS seguirá ampliando su función más allá de la mera información de navegación.

**Ferrocarril:** el GNSS se está convirtiendo en uno de los pilares de las aplicaciones no relacionadas con la seguridad (por ejemplo, gestión de activos), mientras que la adopción futura de GNSS para aplicaciones relacionadas con la seguridad, incluyendo sistemas mejorados de comando y control, se espera que aumente la capacidad de la red ferroviaria, disminuir los costos operativos y fomentar nuevas operaciones de trenes. Gracias a GNSS participando en la digitalización, Rail se está volviendo más seguro, más eficiente y atractivo.

**Carreteras y automoción:** a pesar de la desaceleración mundial de la producción y las ventas de automóviles, la regulación para vehículos más seguros y autónomos va por buen camino, con GNSS sin duda jugando un papel clave. Con In Vehicle Systems siendo la fuente dominante de Posicionamiento.

**Navegación y cronometraje,** además, está claro que el transporte público está adoptando cada vez más GNSS para mejorar sus servicios.

**Espacio:** desde el uso de datos GNSS en tiempo real para la navegación espacial absoluta y relativa, para derivar mediciones de Observación de la Tierra a partir de él, GNSS también ha demostrado su valía para aplicaciones en el espacio. Impulsado por el paradigma NewSpace, la diversificación y proliferación de los usuarios del espacio conduce a una necesidad cada vez mayor de soluciones basadas en GNSS en el espacio.

**Desarrollo urbano y patrimonio cultural** – en este campo, las soluciones basadas en GNSS son utilizadas, junto con EO, para medir y mapear con precisión áreas urbanas y para construir modelos 3D avanzados del entorno construido. Con más del 56% de la población ya viven en áreas urbanas y se espera que este número aumente, soluciones digitales impulsado por GNSS será más necesario que nunca para apoyar el crecimiento sostenible.

### **Satélites LEO PNT y otros sistemas complemento a GNSS**

El GPS y otros GNSS que operan en la órbita terrestre media (MEO) son el dominio principal para los servicios de posicionamiento, navegación y temporización (PNT). Pero estas señales son débiles y están sujetas a interferencias, tanto intencionales como no intencionales.

Las soluciones fuera del territorio GNSS, como los satélites LEO, la infraestructura inalámbrica terrestre, la transferencia de tiempo de red y las señales de oportunidad, son necesarias para proporcionar un respaldo esencial para los sistemas dependientes de PNT y salvaguardar nuestra infraestructura crítica nacional.

Hasta ahora, todos los satélites de navegación han volado a gran altura en la órbita terrestre media, hasta 23 222 km en el caso de Galileo, que ofrece una precisión de nivel de metro. A tales altitudes, los satélites se mueven lentamente por el cielo, lo que ayuda a garantizar la disponibilidad global de las señales de navegación por satélite, aunque con una potencia relativamente baja.

En la Cumbre de Navegación por Satélite de Múnich de 2022, oradores de EE. UU. y Europa hablaron sobre los satélites LEO para los nuevos servicios PNT.

Las megaconstelaciones LEO del mañana operarán en combinación con las soluciones GNSS existentes y/o proporcionarán servicios PNT completos por sí mismos. Ayudarán a impulsar las últimas aplicaciones autónomas, aprovechando las tecnologías New Space, 5G y más.

La constelación LEO PNT de la ESA pasará a un enfoque de "sistema de sistemas multicapa", con señales de órbita terrestre media complementadas con las de satélites de órbita terrestre baja (LEO) a altitudes inferiores a 2000 km, junto con entradas adicionales de sistemas PNT terrestres. y sensores basados en el usuario, compuestos por aproximadamente una docena de satélites, que ayudan a las empresas europeas a avanzar en un momento en que el interés comercial mundial es alto en constelaciones LEO de todo tipo, especialmente para telecomunicaciones y PNT.

Los satélites en sí se pueden simplificar en comparación con los satélites de navegación por satélite actuales, ya que esencialmente estarían retransmitiendo señales de navegación por satélite de MEO. Este es un punto clave porque se necesitarán muchos más satélites para garantizar la cobertura global, porque cuanto más baja sea la órbita, más rápido pasará cada satélite individual por el cielo. Este hecho también abre el camino a

un enfoque de 'Nuevo Espacio' más ágil para la construcción de satélites para las empresas europeas, con cargas útiles más pequeñas y operaciones simplificadas desde Tierra.

Sus señales serán mucho más fuertes (potencialmente capaces de penetrar en interiores) y se transmitirán en frecuencias novedosas, lo que, junto con las nuevas geometrías posibles gracias a los satélites LEO, debería mejorar la resiliencia general del servicio. LEO PNT también ofrecerá correcciones de posición más rápidas y permitirá verificaciones rápidas de autenticación bidireccional. Y la disponibilidad general de la señal aumentará enormemente.

La mayoría de los recursos PNT se entregan a través de constelaciones de satélites GNSS que se encuentran en órbita terrestre media (MEO), como GPS (Estados Unidos), Galileo (Unión Europea), GLONASS (Rusia) y BeiDou (China).

Las cuatro categorías de recursos fuera del dominio que pueden entregar datos PNT son:

- Órbita terrestre baja (LEO): datos de ubicación y tiempo satelital desde una órbita en el espacio aproximadamente 25 veces más cerca que GNSS
- Transferencia de tiempo de red: datos de tiempo precisos de relojes sincronizados a través de una red informática de alta velocidad
- Infraestructura inalámbrica terrestre: datos de tiempo y ubicación de equipos terrestres y operaciones de soporte en una región geográfica específica
- Señales de oportunidad: datos de ubicación derivados de forma innovadora de señales de radio que no se diseñaron originalmente para fines de navegación

Las constelaciones LEO tienen características operativas y características de rendimiento diferentes a las de los sistemas MEO, como una mayor intensidad de la señal y una mayor seguridad. Las soluciones basadas en LEO también son globales por naturaleza y ofrecen cobertura mundial, posicionamiento 2D/3D y sincronización precisa en un solo sistema.

Aunque algunas soluciones PNT resilientes en constelaciones LEO todavía están en desarrollo y se han propuesto otras, Satellite Time and Location (STL) es la única solución PNT alternativa en esta categoría que actualmente opera en el nivel de preparación tecnológica (TRL) 9, con un historial de varios años de brindar un servicio confiable a los clientes.

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

En las últimas décadas, los teléfonos móviles se han vuelto tan omnipresentes que hoy en día es impensable imaginar nuestras vidas sin esta tecnología. La información de ubicación se ha vuelto crucial en varias circunstancias, como los servicios de rescate, la gestión de emergencias y el entretenimiento. Esta dependencia de la ubicación ha impulsado la investigación, el desarrollo y los negocios en torno al tema de la navegación con teléfonos inteligentes. Y recientemente con la liberación de los ficheros de observación con datos brutos o en formato RINEX puede suponer una gran oportunidad de mercado.

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.

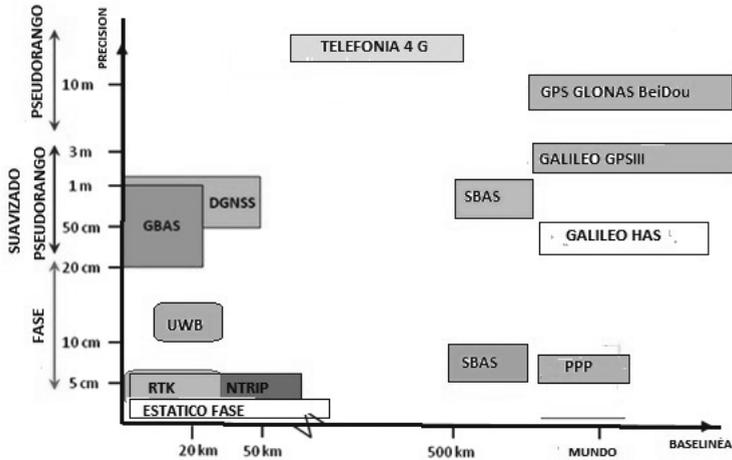
**El posicionamiento en interiores (indoor positioning)** es la fuerte apuesta para los próximos años. Aun cuando existen diversas tecnologías que podrían utilizarse para mejorar los datos en esta área, como son la banda ultra ancha, acelerómetros e identificación por radiofrecuencia (RFID), no existe 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).

**Desde el punto de vista geomático**, 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.



Técnicas corrección GNSS: estatico RTK, NTRIP, DGNS, PPP, GALILEO HAS

Tecnologías GNSS corrección satelital SBAS y tecnología corrección basada en tierra GBAS

Constelaciones GNSS: GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO

Técnicas comunicacion telefonía, UWB

**Figura 3. Precisión en posicionamiento**

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 centimétrica o milimétrica 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.

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.

## SISTEMAS GNSS

Las constelaciones del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) se refieren a una serie de satélites en órbita media que proporcionan datos de posicionamiento, navegación y temporización a los receptores GNSS en la Tierra. Hay cuatro constelaciones GNSS de cobertura global y dos de cobertura regional, además de otros sistemas para mejorar el posicionamiento en tiempo real

**GPS.** El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los Estados Unidos, operado por la Fuerza Espacial de los EE. UU., es el sistema GNSS más antiguo que entró en funcionamiento en 1978 y estuvo disponible para uso global en 1994. Como fue creado originalmente como un sistema de navegación militar independiente por el Departamento de Defensa (DoD), se hizo un esfuerzo significativo para proporcionar una alta precisión y también para que sea seguro contra intentos de interferencia y suplantación de identidad. El GPS opera en la frecuencia de Banda L de 1176.45 a 1575.42 MHz. Y puede proporcionar una precisión de posicionamiento en tiempo real en el rango de centímetros y una precisión a largo plazo en el rango de milímetros.

**GALILEO** es el sistema GNSS de Europa. Fue creado por la Unión Europea a través de la Agencia Espacial Europea y comenzó a brindar servicio en diciembre de 2016. Está formado por 30 satélites y funciona en una frecuencia de 1176,45 a 1575,42 MHz.

**GLONASS.** El Sistema Global de Navegación por Satélite de Rusia (GLONASS) es el segundo sistema de navegación en operación con cobertura global y de precisión comparable al GPS. Fue desarrollado por Roscosmos y opera en la frecuencia de 1202.026 a 1600.995 MHz.

**BeiDou** es el sistema de navegación por satélite chino, operado por la Administración Nacional del Espacio de China (CNSA), que se encuentra actualmente en su 3.<sup>a</sup> generación de desarrollo. La primera generación se llamó BeiDou-1 y fue utilizada principalmente por China y las regiones vecinas. Fue dado de baja a fines de 2012. La segunda generación, llamada BeiDou-2, ha estado en uso desde 2012 e inicialmente constaba solo de 10 satélites. Puede servir a usuarios en toda la región de Asia-Pacífico. La última generación llamada BeiDou-3 tiene 35 satélites y el último se lanzó el 23 de junio de 2020 y servirá a usuarios de todo el mundo. En total, se han lanzado 55 satélites para BeiDou.



# Índice

Prólogo.....	III
Prólogo autor.....	VII
Capítulo 1. Introducción .....	1
Capítulo 2. La Tierra. Sistemas de referencia y sistemas de tiempos .....	29
Capítulo 3. Órbitas de los satélites.....	73
Capítulo 4. Fundamentos GNSS .....	125
Capítulo 5. Sistema GNSS. GPS.....	149
Capítulo 6. GALILEO y otros Sistemas GNSS .....	181
Capítulo 7. Obseables .....	245
Capítulo 8. Fuentes de error en observaciones GNSS .....	279
Capítulo 9. La Ionosfera.....	313
Capítulo 10. Refracción troposférica .....	337
Capítulo 11. Métodos de observación y posicionamiento GNSS .....	397
Capítulo 12. Combinación de fase. Ambigüedades y línea base.....	429
Capítulo 13. Modelos matemáticos. Cálculo y compensación de redes.....	453

Capítulo 14. Posicionamiento absoluto y relativo.....	469
Capítulo 15. Análisis estadístico de hipótesis y resultados. Fiabilidad y precisión. Solución de redes .....	487
Capítulo 16. Cálculo y ajuste de redes topográficas y geodésicas .....	509
Capítulo 17. Correcciones diferenciales.....	539
Capítulo 18. DGNSS grandes áreas SBAS y otros.....	603
Capítulo 19. Posicionamiento de Punto Preciso PPP .....	639
Capítulo 20. Altimetría por satélite .....	697
Capítulo 21. GNSS en dispositivos móviles Android .....	721
Bibliografía .....	749
Acrónimos .....	751

# 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 "matica" (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.

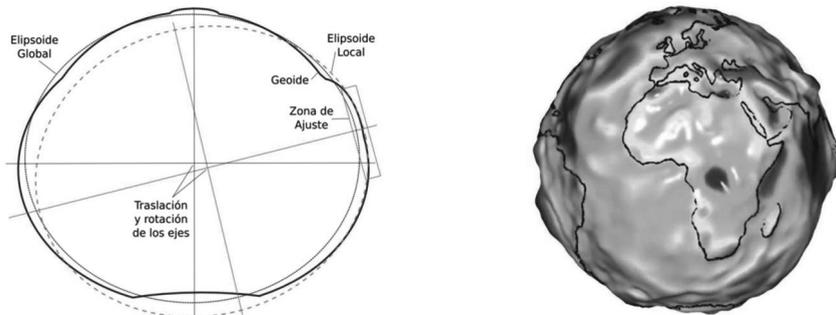
A la Geodesia le corresponde el posicionamiento preciso sobre la Tierra, Helmert (1880) define la Geodesia como la ciencia de la medida y representación de la Tierra. Esta definición en la actualidad debe completarse con el estudio de su campo de gravedad, sus variaciones temporales y rotación.

**La Geodesia estudia la forma de la Tierra, su campo de gravedad y su rotación y cómo estos varían en el tiempo**, para ello los marcos de referencia globales y estables son esenciales, estos son fundamentales para la determinación de coordenadas, así como

la posición de la Tierra en el espacio, además estos marcos de referencia son fundamentales para el estudio del cambio global y su impacto.

La monitorización del Sistema Tierra, en especial de la variación de parámetros físicos relacionados con su forma, gravedad, rotación y orientación en el Universo, constituye una herramienta fundamental que nos ayuda a entender los procesos que contribuyen al cambio global y sus interacciones (tierra, océanos, casquetes polares, hidrología, atmósfera). Sólo la correcta interpretación de estos procesos nos ayudará a tomar decisiones inteligentes con la anticipación necesaria para que tengan un impacto oportuno. Las redes de infraestructuras de Geodesia Espacial son fundamentales para poder monitorizar estos procesos relacionados con el cambio global.

La Geodesia 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 geo-espaciales, como los sistemas GNSS, la navegación inercial, y técnicas gravimétricas modernas.



Fuente: NASA

**Figura 4. Geoides 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.

1. **Geodesia geométrica:** estudia la geometría del elipsoide de revolución, es la determinación de la geometría, parámetros de tamaño y forma y posición del elipsoide.
2. **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.
3. **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**.

4. **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 geoide, 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 EE. UU., 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 EE. UU., 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.

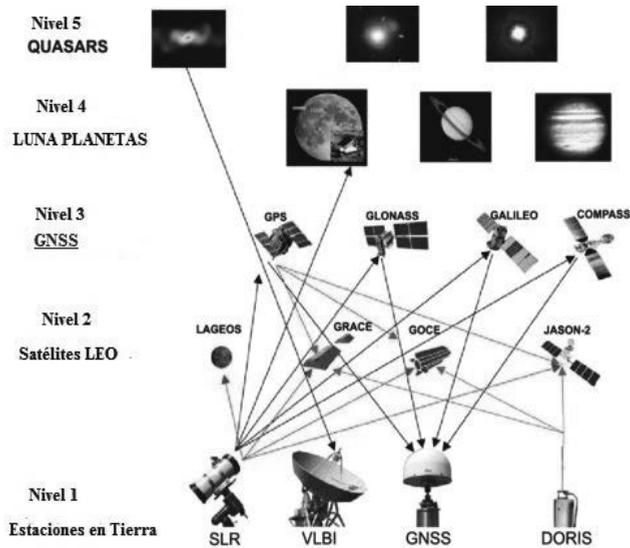
La infraestructura de GGOS consta de cinco niveles dependiendo de la distancia a la Tierra:

- 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.

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
- Evaluación de desastres naturales (volcanes, sismos)
- Meteorología
- Agricultura de precisión
- Navegación autónoma
- Ciencias de la Tierra



Fuente: Jaroslaw Bosy

Figura 5. Niveles observación espacio

## Técnicas de medición de Geodesia Espacial

Las Técnicas de Geodesia Espacial permiten por una parte la localización precisa de los satélites que se encargan del control climático al establecer marcos de referencia terrestres y celestes con gran precisión., así como la determinar la posición de cualquier punto en la Tierra con precisión centimétrica, monitorizar variaciones en su periodo de rotación con precisiones de millonésimas de segundo, establecer el eje de rotación en el espacio con miles de millonésimas de grado y medir cambios en el campo gravitatorio que pueden perturbar la posición de la órbita de un satélite con millonésimas de metro. La medida de estas variaciones con tan impresionante precisión nos permite inferir las causas que los provocan: movimientos de masas oceánicas y terrestres, cambios en el nivel medio del mar, de su temperatura y salinidad, factores que afectan el cambio de estaciones, mareas, modelos climáticos y comportamiento de los casquetes polares entre otros.

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, cuásars...) con ondas electromagnéticas. Estas estaciones pueden ser pasivas, no emiten señal, solo las reciben desde los satélites o cuásars (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 con el 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**

Telemetría Laser para hacer rastreo de satélites y de la Luna. Es un sistema de observación de distancia por rayos láser. 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 retrorreflectores de los satélites, como se muestra en la figura 6. Estos retrorreflectores 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 retrorreflectores “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).

El proceso se realiza desde varias estaciones en tierra de forma simultánea, la precisión obtenida es del orden de 1-2 cm.

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. 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.

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 7.

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.

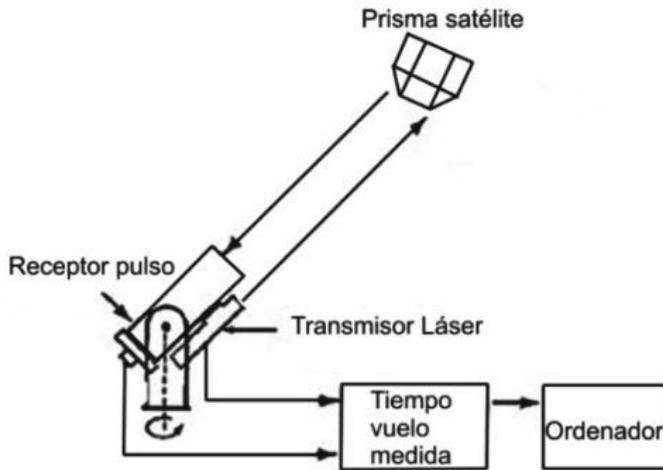


Figura 6. Medida SLR

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 retroreflectores láser. Así mismo los nuevos sistemas de navegación GNSS incorporan retroreflectores 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.



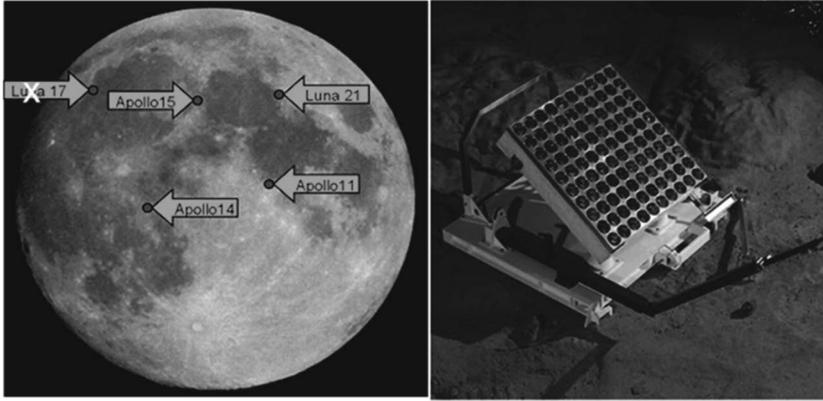
Fuente: ROA, Cádiz

**Figura 7. Observatorio San Fernando**

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

La red internacional de alrededor de 40 estaciones SLR y 4 LLR realiza un seguimiento rutinario de más de 120 satélites en altitudes que van desde los 250 km hasta los 35 000 km y seis conjuntos de reflectores (Apollo y Lunokhod) colocados en la superficie de la Luna.



Fuente: NASA

**Figura 8. Retrorreflector lunar y situación en la luna**

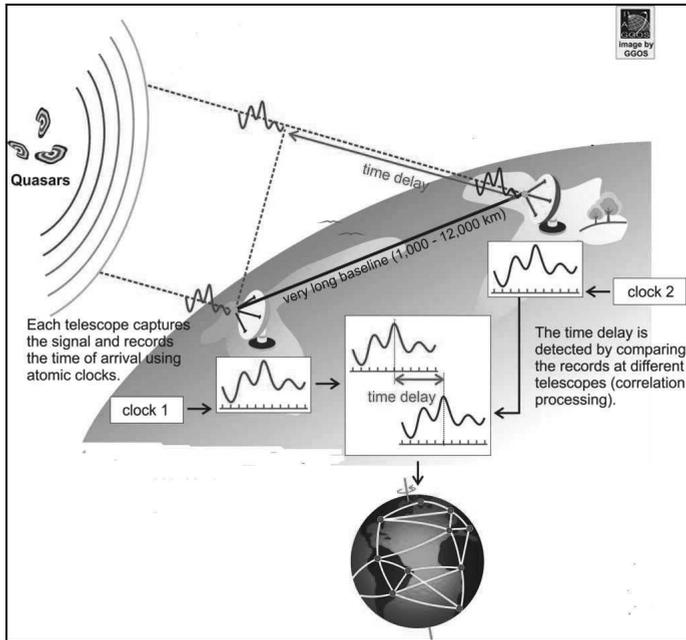
Además, la SLR proporciona una determinación de órbita precisa para misiones de altímetros de radar a bordo de vehículos espaciales que trazan un mapa de la superficie oceánica (que se utilizan para modelar la circulación oceánica global), para trazar cambios volumétricos en las masas de hielo continental 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 retroreflectores sobre la Luna por parte de EE. UU., 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

Técnica de observaciones extragalácticas fundamental para determinar la orientación de la Tierra en el espacio y su escala.

VLBI es una técnica geodésica espacial basada en la radioastronomía. Las señales de radio emitidas por fuentes extragalácticas (quásares: fuentes de radio cuasi-estelares, radiogalaxias) son captadas por un par de antenas direccionales (radiotelescopios) ubicadas en la superficie de la Tierra. Debido a la diferente posición de las antenas, la misma señal llega a cada antena con una ligera diferencia de tiempo que va de 0,003 a 0,050 segundos. Este retraso de tiempo se mide con una precisión de una billonésima de segundo (pico-segundo) con sofisticados relojes atómicos instalados en cada antena. Al multiplicar el tiempo de retardo por la velocidad de la luz, se puede determinar la distancia entre las dos antenas con una precisión de unos pocos milímetros.



Fuente: GGOS (Laura Sánchez)

**Figura 9. VLBI**

La misma señal emitida por fuentes de radio extragalácticas es captada por múltiples telescopios en la Tierra. La señal llega a los telescopios en diferentes momentos, es decir, con un retraso de tiempo cada telescopio captura la señal y registra la hora de llegada utilizando relojes atómicos, la línea de base de distancia entre el radiotelescopio se calcula utilizando los retrasos de tiempo detectados. El retraso de tiempo se detecta comparando los registros en diferentes telescopios (procesamiento de correlación). El procesamiento conjunto de retardos de tiempo y línea base de una red global de radiotelescopios permite determinar posiciones precisas de los radiotelescopios y la orientación de la Tierra en el espacio.

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.

El retardo de tiempo entre los tiempos de llegada de las mismas señales a las dos antenas se deduce de una comparación (correlación cruzada) de las señales recibidas en cada

**Para seguir leyendo, inicie el  
proceso de compra, click aquí**