

# TÉCNICAS G.P.S.

## (Sistema de Posicionamiento Global)

ALFONSO NÚÑEZ GARCÍA DEL POZO  
 INSTITUTO DE ASTRONOMÍA Y GEODESIA  
 C.S.I.C.

La geodesia espacial se basa fundamentalmente en la observación (recepción) de señales formadas por radiaciones del espectro electromagnético de objetos que no están ligados físicamente a la Tierra, en particular a satélites artificiales que orbitan alrededor de la Tierra, y que de forma continua envían señales que pueden ser recogidas por receptores situados en la superficie terrestre.

Las técnicas geodésicas y topográficas clásicas, medición de ángulos, distancias, acimutes y nivelación geométrica y trigonométrica, permiten determinar coordenadas (o diferencias de coordenadas) de puntos localizados sobre la Tierra con gran precisión relativa. Ahora bien, es siempre necesaria la intervisibilidad entre estos puntos para realizar las observaciones, problema de gran importancia y muchas veces de difícil solución o irrealizable.

Por otra parte, la navegación, tanto marítima como aérea, necesita de posicionamiento de cierta garantía en tiempo real, no pudiendo la geodesia clásica con sus métodos tradicionales de observación dar respuesta a este problema. Esta fue la razón principal por la que los satélites artificiales empezaron a ser utilizados para fines de posicionamiento, tanto de objetos móviles, como aviones o barcos, o de puntos fijos a la superficie terrestre.

Las primeras observaciones a saté-



lites para fines geodésicos de posicionamiento se realizaron en el año 1966, dentro del proyecto PAGEOS, mediante fotografías y observando al satélite en su movimiento respecto a las estrellas, que pueden suponerse fijas con cierta proximación y la ayuda de ciertas correcciones. Se establecieron 45 estaciones en todo el mundo,

que quedaron enlazadas con estas técnicas con una precisión de unos 5 metros, éxito sin precedentes en la historia de la geodesia.

En el año 1964 empezó a ser operativo el sistema de satélites TRANSIT para fines militares de navegación y en 1967 se permitió su uso al sector civil. Este sistema dispone de seis sa-

télites con órbitas polares a 1.100 kilómetros de altitud y mediante técnicas de observación basadas en el efecto Doppler de desplazamiento, o variación de la frecuencia de la fuente emisora en función de la velocidad de alejamiento o acercamiento, pueden determinarse posiciones de puntos de observación con precisiones muy elevadas, mejores que 1 metro.

En España se ha utilizado sistemáticamente este sistema para fines geodésicos de mejora de la Red Fundamental y unión al resto de países de la Europa Occidental dentro del proyecto RETRIG para el Cálculo de la Red de Triangulación Europea.

Existen dos formas de posicionamiento para fines geodésicos, punto aislado en que únicamente observa un receptor y se obtienen coordenadas absolutas respecto de un sistema de referencia geocéntrico tridimensional, y posicionamiento relativo en que observan simultáneamente varios receptores, obteniéndose la posición relativa respecto al mismo sistema de referencia entre los puntos de observación. En ambos casos el posicionamiento es estático, es decir, el receptor está fijo en un punto y únicamente solidario al movimiento de la Tierra.

En navegación se utiliza mucho el sistema Doppler para fines marítimos, pero no así en navegación aérea o terrestre, puesto que la velocidad propia de los vehículos tiene una falta de homogeneidad tanto en velocidad como en altitud, que impide la adecuada utilización y proceso de cálculo de las señales recibidas de los satélites.

### El Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Las necesidades de navegación para fines militares hicieron que en 1965 el Departamento de Defensa de Estados Unidos empezase a desarrollar un nuevo sistema denominado Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que empezó a ser real en 1978 con el lanzamiento y puesta en órbita del primer satélite de la constelación NAVSTAR.

Este sistema es inminentemente militar, pero los estamentos científicos

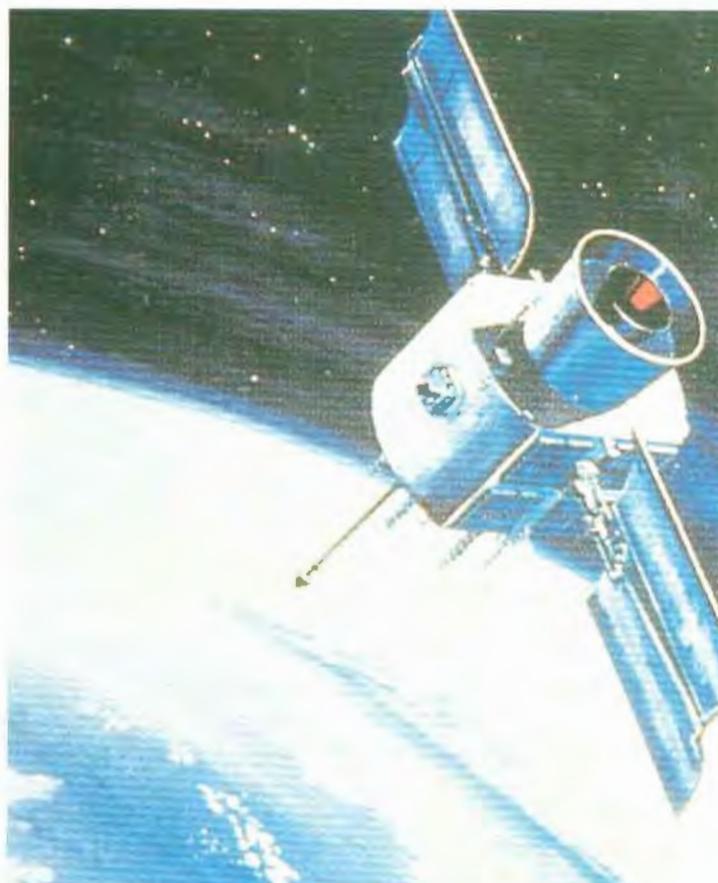
y comerciales civiles lo están utilizando para fines de investigación y producción desde la década de los 80, a pesar de que la constelación está incompleta en la actualidad y la cobertura de satélites no es suficiente para observación continua las 24 horas del día. No obstante, se espera que para finales del año 91 o principios del 92, la constelación NAVSTAR ofrezca cobertura continua en cualquier lugar de la Tierra, momento en que será totalmente productivo el sistema para fines de posicionamiento, tanto en aplicaciones geodésicas como topográficas.

Al igual que en el sistema Doppler, el posicionamiento GPS puede ser cinemático o estático, dependiendo de que el receptor se mueva o no se mueva. De la misma forma, si se pretende determinar coordenadas de un punto respecto del sistema de referencia GPS el posicionamiento se llama absoluto, y si se pretende determinar diferencias de coordenadas, el posicionamiento se llama relativo o diferencial.

En GPS podemos distinguir tres sectores: el sector espacial constituido por la constelación de satélites NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging), esto es, satélites de navegación, cronometría y distanciometría, fabricados por Rockwell International, de Estados Unidos. El sector de control o de seguimiento continuo de estos satélites, formado por cinco estaciones, una en Colorado Springs, en Estados Unidos, que es la estación maestra o central, en Ascensión, en el Atlántico Sur, Diego García, en el Índico, Kwajalein, en el Pacífico Occidental y Hawaii, en el Pacífico Oriental. Por último se tiene el sector usuario, formado por la propia instrumentación GPS, es decir, los receptores que captan las señales de los satélites y el software para procesar esta información.

### Sector Espacial

Se han planificado tres generaciones distintas de satélites. La primera



*Actualmente hay 13 satélites operativos que dan una cobertura de observación para España de unas 11 horas diarias. (Satélite GPS.)*

totalmente experimental, pero parcialmente en servicio para los usuarios, la segunda operativa pero no completa en la actualidad y la tercera en fase de proyecto.

El bloque segundo de satélites fue lanzado al espacio entre 1978 y 1985, llevándose los satélites relojes (osciladores) de cuarzo y atómicos de rubidio y cesio de alta precisión. El accidente sufrido por el transbordador Challenger en enero de 1986 ha retrasado el lanzamiento del bloque II, siendo ésta la razón de la no completa operatividad del GPS. En la actualidad se están lanzando los satélites a través del cohete MLV DELTA II, llevando todos relojes atómicos.

Cuando la constelación NAVSTAR del bloque II esté completa, constará de 24 satélites recorriendo 6 órbitas distintas, casi circulares con inclinación de  $55^\circ$  y una altitud de unos 22.000 kilómetros, que recorrerán su órbita en 12 horas, dando cobertura para la observación GPS las 24 horas del día en cualquier punto

de la Tierra. Digamos que en este momento hay 13 satélites operativos que dan una cobertura de observación para España de unas 11 horas diarias, no seguidas y considerando un mínimo de cuatro satélites observables para fines de posicionamiento relativo de precisión, es decir, para fines geodésicos y topográficos.

#### *Sector de Control*

Las estaciones de seguimiento están espaciadas de forma regular en longitud y tienen su posición fijada con gran precisión a partir de observaciones a objetos extragalácticos con técnicas VLBI (Interferometría de Muy Larga Base) y láser a satélites. En estas estaciones se tienen receptores GPS con relojes atómicos y doble frecuencia, que permiten mediante observación resolver el problema inverso al de posicionamiento terrestre, esto es, conocidas las coordenadas de los puntos de seguimiento y mediante observación GPS se establece de forma precisa las posiciones (efemérides) de los satélites con un error estimado de unos 5 a 25 metros, o de 0,2 a 1 parte por millón a una distancia de 22.000 kilómetros.

Ahora bien, estas efemérides se extrapolan perdiéndose parte de la precisión, pudiéndose hablar para España, por ejemplo, de garantías de unos 50 a 80 metros, que permite precisiones del orden de 3 a 4 partes por millón en el mejor de los casos, no suficientes para fines geodésicos o geodinámicos, pero sí para fines topográficos, que son de extraordinaria calidad.

#### *Sector Usuario*

Como se indicó, el sector usuario GPS se entiende como la instrumentación para la recepción de las señales emitidas por los satélites, y su posterior proceso en ordenador para la obtención de los resultados solicitados por el usuario. El instrumento o equipo GPS consta de una antena, que una vez estacionada es la referencia que se intenta dar posición, el receptor propiamente dicho al que va unida la antena, bien directamente o por cable. El receptor consta de una sec-

ción de recepción de radiofrecuencias, con distintos canales para poder seguir simultáneamente a varios satélites, un procesador con su correspondiente paquete de software, una unidad de memoria, un teclado de control con una pantalla de comunicación con el usuario, una fuente de alimentación y normalmente un reloj interno que permite establecer frecuencias internas de referencia.

#### **Clasificación de los sistemas de GPS**

Los sistemas de medida en GPS pueden clasificarse en tres grupos, método Doppler, de pseudodistancias y de fases.

##### *El método Doppler*

Es igual al utilizado para fines geodésicos con la constelación TRANSIT, con la diferencia de que los satélites GPS orbitan a una altitud mucho mayor que los TRANSIT, los primeros a 20.000 kilómetros de altitud con un período de 12 horas y los segundos a 1.000 kilómetros con un período de 2 horas, lo que hace que la cuenta Doppler se observe en el sistema GPS con mucha menos precisión y que este método no se utilice para fines de posicionamiento preciso. No obstante, se utiliza para determinar de forma rápida posiciones aproximadas de las estaciones para entrar en otros métodos más precisos que describimos a continuación.

##### *El método de pseudodistancias*

Es una trilateración espacial (en tres dimensiones), en que conocidas en cada instante las coordenadas de los satélites permite determinar coordenadas o diferencias de coordenadas entre las estaciones. La observación realizada por el receptor en realidad no es una distancia, sino el tiempo que tarda la onda electromagnética emitida por el satélite en llegar al receptor a una velocidad que es aproximadamente la de la luz. El orden de precisión que oferta este método es de unos 10 metros (dependiendo de la garantía de las efemérides de los satélites) en tiempo real, y se utiliza principalmente para fines de navegación.



Como el método Doppler, también se utiliza para dar posición de forma aproximada.

*El método de medida de fases*

Es el que permite una mayor precisión y tiene el siguiente fundamento: una frecuencia de referencia dada por el oscilador que controla el receptor, se compara con la portadora emitida por el satélite en un instante conocido dado por el reloj del satélite. Dicho con otras palabras, se controla la onda electromagnética emitida por el satélite en un punto de coordenadas conocidas (efemérides del satélite) y con una frecuencia conocida a través del reloj del satélite. Distintos algoritmos de cálculo aplicadas a las diferencias de fase observadas, dependiendo del número de estaciones y de satélites simultáneamente observados, permiten eliminar errores sistemáticos, como la mala sincronización de los relojes del satélite y receptor, minimizar el error debido a una posible marcha defectuosa del reloj del receptor durante el período de observación, errores debi-

dos a los efectos de la atmósfera en la propagación de la onda, retardos debidos a la presencia de la atmósfera. Como discutiremos a continuación, este método permite la determinación de posiciones relativas con gran precisión y es el método empleado en aplicaciones geodésicas y topográficas.

**Métodos de posicionamiento**

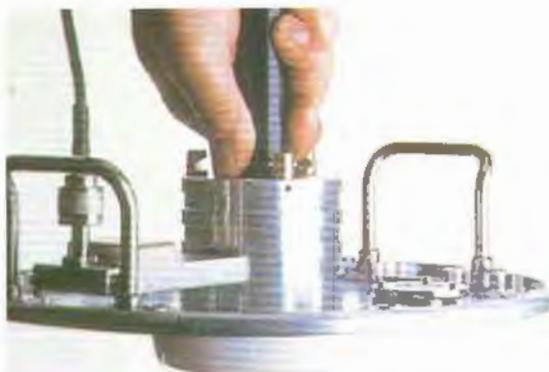
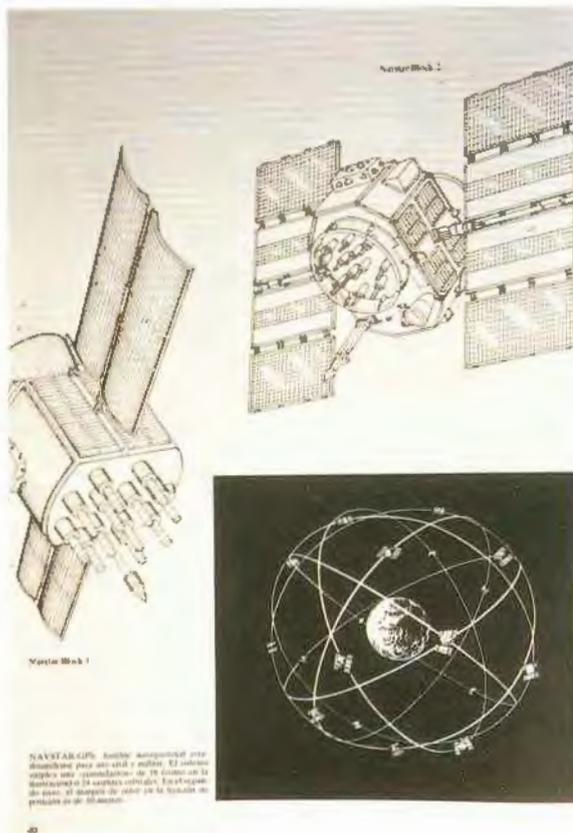
Los métodos de posicionamiento pueden dividirse en dos grandes grupos: posicionamiento absoluto cuando únicamente se pretende determinar la posición de un punto estacionado con GPS, y relativo cuando se determina la posición de un punto respecto a otro, ambos estacionados con receptores GPS, observando simultáneamente a los mismos satélites. La ventaja del segundo método en cuanto a su precisión reside en que elimina errores sistemáticos importantes, que se dan en la misma forma en las estaciones de observación. En aplicaciones geodésicas y topográficas se emplea con exclusividad este método.

Dependiendo de la forma de tra-

bajo de los receptores se puede hacer una segunda clasificación, forma estática cuando los receptores están quietos o dinámica cuando los receptores están en movimiento, obteniéndose las coordenadas del móvil, por ejemplo un avión, y en cada instante, por ejemplo cada 10 segundos. Existe también una técnica mixta, combinación de las anteriores, que se basa en que los receptores no pierdan la señal emitida por los satélites, observando en forma estática desde la señal a dar posición. Esta técnica llamada *semicinemática* tiene la ventaja de un ahorro de tiempo considerable en la observación, puesto que la incógnita de ambigüedad de ciclos va determinada desde el inicio de la observación, siempre que no se pierda en ningún momento el enlace físico con los satélites.

**Aplicación de técnicas GPS en geodesia y topografía**

La aplicación de técnicas GPS en geodesia y topografía es un tema todavía abierto, debido fundamentalmente a que la constelación no está completa y



*Instrumentos para la observación.*

que obtener efemérides precisas de los satélites no es un problema sencillo.

Para estos fines, el posicionamiento absoluto no es aplicable, debido a su falta de precisión, por tanto nos vamos a referir al posicionamiento relativo exclusivamente.

Los métodos clásicos de observación geodésica ofertan precisiones locales muy altas, pero que en el mejor de los casos son de 1 parte por millón, de 0,1 parte por millón en microgeodesia o topografía de alta precisión y de unas 10 partes por millón en topografía convencional. Ahora bien, estas precisiones locales no se mantienen a nivel global, por ejemplo en una red de triangulación de primer orden o fundamental, la acumulación de errores sistemáticos y aleatorios, hace que a grandes distancias del punto origen o DATUM, se pierda la excelente precisión local de los métodos clásicos. Una forma de evitar este problema es la introducción de observaciones espaciales a satélites, que en grandes distancias de cientos o miles de kilómetros, garantizan precisiones mejores que 1 parte por millón. Así, las observaciones Doppler permitieron enlazar España con Finlandia con precisión mejor que 1 metro a través de la red Europea de Triangulación, hecho impensable con la geodesia clásica. Con las nuevas técnicas de observación GPS se espera conseguir resultados mejores, habiéndose efectuado en 1989 una campaña masiva de GPS en Europa dentro del proyecto EUREF (European Reference System) que va a permitir precisiones globales en la Red Europea del orden de 0,1 partes por millón.

Otros proyectos de gran importancia para la aplicación de fines geodésicos del GPS son, por ejemplo, la unión de la red de mareógrafos de Europa para el estudio de niveles medios del mar y refuerzo de la red de nivelación de alta precisión, determinación de perfiles del geoide sobre redes de nivelación, etc. Estos ejemplos ponen de manifiesto que la contribución del GPS a la geodesia es de tipo científico, evidenciando la potencia de estas nuevas tecnologías, no habiéndose clarificado todavía su aplicación



*Los métodos clásicos de observación geodésica ofertan precisiones locales muy altas.*

a fines de producción, debido sobre todo a la falta de garantía de las efemérides transmitidas de los satélites. Digamos finalmente, que en estas campañas europeas se ha hecho determinación de órbitas con observatorios permanentes situados a lo largo de toda Europa.

Es en geodesia de orden inferior, densificación de redes, donde el GPS tiene en un futuro muy cercano una mayor aplicación. Pensemos, por ejemplo, en la densificación de la red de Tercer Orden de España mediante observación GPS. Esta red que se puede denominar de Cuarto Orden, tendría lados de 2 a 4 kilómetros y sería de una extraordinaria uniformidad, puesto que los condicionantes orográficos no serían impedimento serio, al no ser necesaria la intervisibilidad entre los puntos de la red. A estas distancias el GPS no tiene ningún problema para ofrecer precisiones de orden centimétrico. Con las efemérides transmitidas es más que suficiente, errores de 3 partes por millón a distancias de 4 kilómetros no superan el centímetro. Por otra parte, se facilitaría mucho el proyecto y monumentación de estas redes al poder situar las señales permanentes en lugares más accesibles y más útiles a los futuros usuarios. En cuanto a su observación sería más rápida, precisa y fiable, al no intervenir apenas los posibles errores humanos.

Otra aplicación de suma importancia del GPS en topografía es el apoyo fotogramétrico. Las ventajas se pueden resumir en los siguientes puntos: primero, al no necesitarse intervisibilidad, las estaciones las elige el usuario según sus necesidades y no en función de las condiciones del terreno. Segundo, los puntos pueden, salvo raras excepciones, llevarse pinchados al campo, quedando únicamente situar el receptor en los puntos elegidos. Tercero, la geometría de los puntos de apoyo para posterior restitución debe ser casi perfecta, al no existir condicionantes orográficos. Esto, unido a un mayor rendimiento y precisión, hace presumible que en breve espacio de tiempo el GPS sea indispensable en todo tipo de apoyo fotogramétrico.

Digamos finalmente que el GPS no va a sustituir totalmente a los métodos topográficos. La topografía de obra, relleno taquimétrico, batimetrías, nivelación geométrica, redes de alta precisión, control industrial, replanteo de grandes obras de ingeniería, etc., se seguirán haciendo por métodos clásicos y tradicionales, puesto que el GPS en cortas distancias es muy difícil que consiga superar a los métodos clásicos, tanto en rendimiento como en precisión. Es en distancias superiores a 1 kilómetro en donde el GPS será una herramienta de trabajo de gran utilidad, variando por completo el concepto topográfico.