

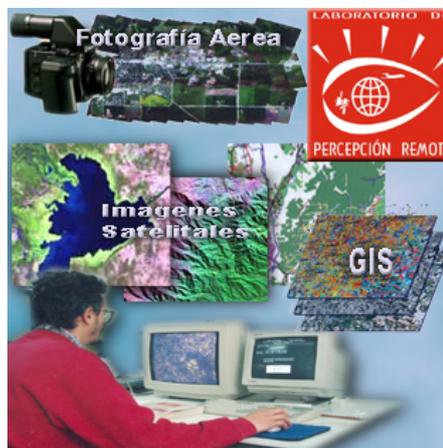
Serie Didáctica N° 3

# Facultad de Ciencias Forestales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO

CATEDRA DE  
TELEDETECCIÓN FORESTAL

## SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL: SISTEMA GPS



Ing. Ftal. Alfredo Fabian REUTER

Febrero de 2001

## ÍNDICE

### CAPITULO I: HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN

1.1. Introducción .....	1
1.2. Observación a globos .....	2
1.3. Métodos de navegación.....	3
1.3.1. Sistemas inerciales .....	3
1.3.2. Radiolocalización .....	3
1.4. Sistemas basados en satélites .....	5
1.4.1. Primeros satélites.....	5
1.4.2 Generalidades sobre satélites.....	5
1.4.3. Tipos de satélites .....	6
1.4.4. Posicionamiento.....	6
1.5. Sistemas actuales.....	7
1.6. Sistema SLR.....	8
1.7. Sistema VLBI .....	13
1.8. Sistema TRANSIT.....	18

### CAPITULO II: CONSTITUCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA GPS

2.1. Introducción .....	20
2.1.1 Definición.....	21
2.2. Servicios ofrecidos por el sistema GPS.....	21
2.3. Descripción del sistema GPS .....	23
2.4. Sector espacial .....	24
2.4.1. Satélites .....	27
2.4.1.1. Satélites del bloque I.....	27
2.4.1.2. Satélites del bloque II.....	28
2.4.1.3. Satélites del bloque II r .....	29
2.5. Sector de control.....	30
2.5.1. Estación maestra de control.....	31

2.5.2. Estaciones de monitoreo.....	31
2.5.3. Estaciones de campo.....	33
2.6. Sector de usuarios.....	34
2.7. Equipo de observación. ....	34
2.7.1. La antena.....	34
2.7.2. El sensor:.....	36
2.7.3. El controlador.....	37
2.8. Clasificación de los receptores GPS.....	38
2.8.1. a. Por el número de canales.....	38
2.8.2. b. Por el tipo de canal.....	39
2.8.3. c. Por el tipo de señal observado:.....	39
2.8.4. d. Por el método de geoposicionamiento.....	40
2.8.5. e. Otras clasificaciones.....	41
2.9. Estructura de la señal.....	42
2.10. Degradación de la precisión.....	44
2.10.1. S/A -- Disponibilidad Selectiva.....	46
2.10.2. A/S -- Antifraude.....	46
2.11. Sistemas de medida.....	47
2.11.1. Pseudodistancia.....	47
2.11.2. Medidas de fase.....	49
2.12. Métodos de posicionamiento.....	50
2.13. Método absoluto.....	50
2.14. Método diferencial.....	50
2.14.1. a. DGPS en tiempo real.....	51
2.14.2. b. DGPS Post-procesado.....	52
2.14.3. c. DGPS de Campo.....	53
2.15. Método Relativo Interferométrico.....	53
2.16. Principios de Funcionamiento.....	54

### **CAPITULO III: ERRORES EN LAS OBSERVACIONES**

3.1. Introducción.....	58
3.2. Errores relativos al satélite.....	60
3.2.1. Error del reloj del satélite.....	60

3.2.2. Errores en los parámetros orbitales .....	60
3.3. Errores relativos a la propagación de la señal .....	61
3.3.1. Refracción ionosférica.....	62
3.3.2. Refracción troposférica .....	64
3.3.3. Disponibilidad selectiva .....	65
3.3.4. Pérdidas de ciclos .....	65
3.3.5. Efecto multipath .....	66
3.4. Errores relativos al receptor .....	68
3.4.1. Error del reloj.....	68
3.4.2. Error en el estacionamiento de la antena.....	68
3.4.3. Errores en la manipulación de los equipos .....	68
3.4.4. Variación del centro radioeléctrico de la antena .....	69
3.5. Dilución de la precisión .....	69
3.6. Conclusión .....	71
Referencias Bibliograficas .....	72

## PRÓLOGO

Esta serie didáctica tiene el objetivo de servir como manual técnico o guía práctica para estudiantes o interesados en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), tanto para aplicaciones técnicas en topografía, digitalización de superficies reales, recopilación de datos para Sistemas de información Geográfica, así como para aplicaciones personales en agrimensura, navegación aérea, marítima y terrestre, o simplemente para actividades de recreación.

El tratamiento de los temas posee una profundidad compatible con un nivel introductorio para estudiosos del tema, siendo de fácil comprensión para aquellos que se inician en el mismo.

Existen temas que no se incluyen y algunos que son tratados en forma superficial, en esta serie didáctica, a los efectos de no complicar y facilitar de esta forma la comprensión de los temas tratados.

Esta serie incluye un análisis histórico de los sistemas de posicionamiento, que precedieron a los actualmente vigentes GPS y GLONASS.

Dada la diversidad de fabricantes y tipos de receptores GPS, esta serie didáctica tratará de manera técnica los diferentes métodos de posicionamiento y tratamiento de datos, así como las consideraciones necesarias para la correcta utilización del equipamiento.

Frecuentemente, los aparatos de GPS se aplican a los trabajos de mapeo como si fueran herramientas mágicas que se llevan al campo, se aprietan unos botones y se toman coordenadas sin tomar en cuenta la forma en que el instrumento trabaja o lo que éste muestra. Los aparatos de GPS NO son mágicos.

Son simplemente instrumentos de alta tecnología que detectan señales relativamente débiles provenientes de satélites en órbita y que hacen trilateración algorítmica en base a las señales que reciben. Todo lo demás que el aparato hace o representa gráficamente es simplemente aquello que el operador programa. El viajar al campo con la noción de que el aparato de GPS ya "conoce" los objetivos de la persona que lo maneja, producirá posiciones registradas que no cumplen las normas necesarias para un trabajo serio de mapeo. El GPS es una herramienta entre varias y su implementación no es necesaria, sí se puede demostrar la efectividad en cuanto a costo o la exactitud de otros métodos menos

sofisticados. Sin embargo, una vez que se ha decidido implementar esta tecnología, el primer paso es entender como funciona y el segundo paso es decidir como aplicarla.

## CAPÍTULO I

### HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN

#### 1.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de navegación solucionan un problema muy antiguo en la historia de la humanidad: La necesidad de conocer la posición sobre la superficie terrestre. Sin esa capacidad los movimientos por tierra deberían basarse en puntos de referencia conocidos, y los movimientos marítimos deben restringirse a una franja de mar en que la costa sea visible.

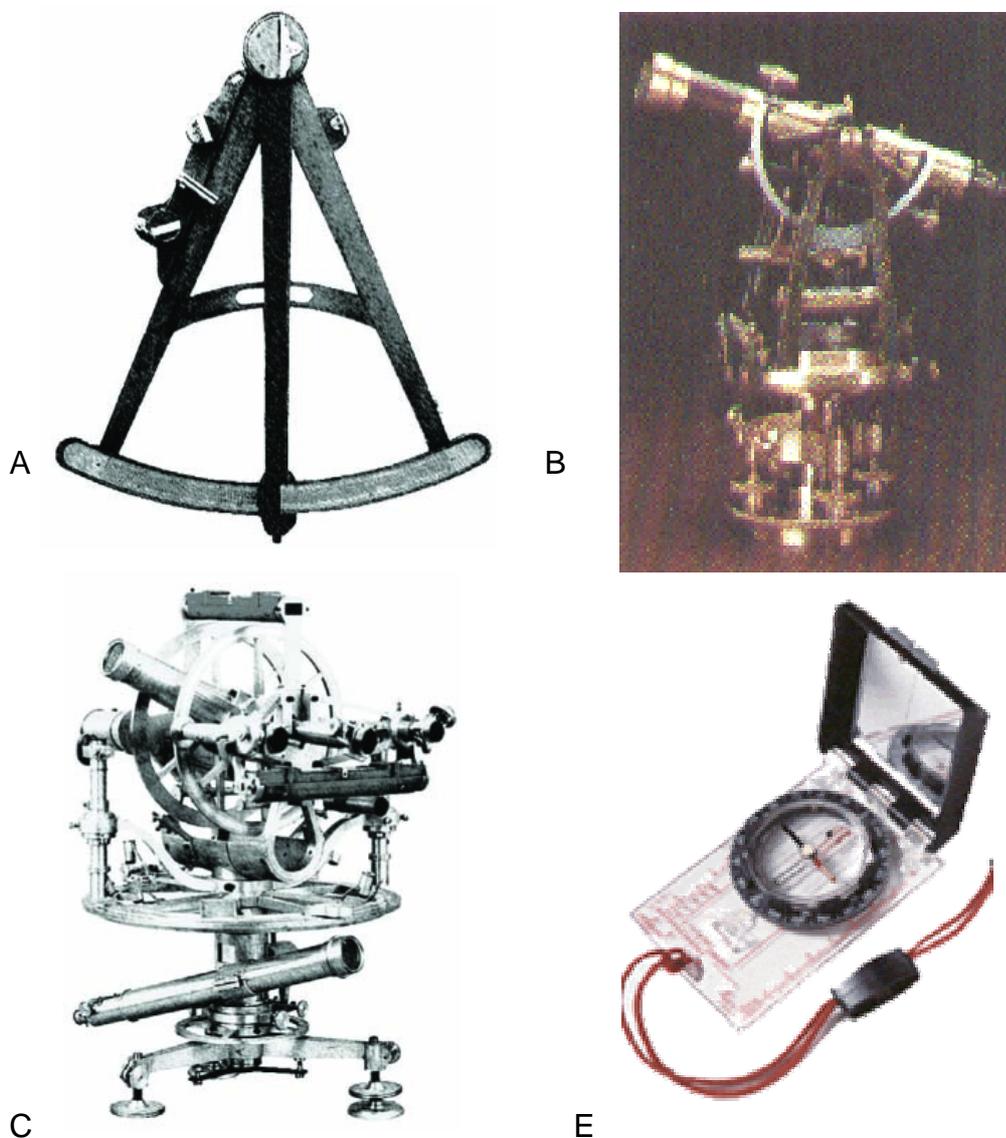


Figura 1: Instrumentos usados para navegación: A Octante, B Astrolabio, C Teodolito, D Brújula

Al principio el hombre se basó en la observación de los astros para obtener

- Referencias espaciales: como la estrella Polar indicando el norte en el hemisferio norte y la cruz del sur en el hemisferio sur.
- Temporales: como la altura del Sol.

Las observaciones astronómicas favorecieron el desarrollo de la trigonometría y la geometría esférica.

Más adelante se desarrolló el astrolabio que permitió medir con mayor precisión la altura de los astros, con lo que la medida de la posición fue mucho más precisa.

Para obtener una buena estimación de la posición es necesario conocer de forma fiable el tiempo, por lo que fue necesario el desarrollo de mecanismos de relojería más precisos que la simple observación Solar.

Con el descubrimiento de la brújula la tarea de navegar mar adentro se hizo mucho más segura.

Los métodos antiguos no permiten una gran precisión, se consiguen mediante complejos cálculos que no los hacen útiles para posicionar vehículos a gran velocidad, y no funcionan en todas las condiciones meteorológicas. Con la llegada del siglo XX aparecieron nuevos sistemas de posicionamiento.

La principal fuerza de desarrollo provino, como tantas cosas en las telecomunicaciones, de los intereses militares, que buscaban determinar la posición de sus unidades de ataque para guiarlas hacia sus objetivos.

## **1.2. OBSERVACIÓN A GLOBOS**

Hubo brillantes enlaces entre redes sin íntervisibilidad, como la unión entre las redes geodésicas británica y escandinava, hecha entre las costas escocesa y noruega, o el enlace geodésico de la isla de Córcega al continente europeo.

Estas operaciones se hicieron observando desde ambas costas (no ínter visibles) con una serie de teodolitos, de lectura fotográfica sincronizada por radio, a globos sucesivamente liberados a lo largo de una línea intermedia entre ambas costas. Así se establecía entre ambas redes, por intersección directa, una cortina de puntos comunes con coordenadas en el sistema de cada red, pudiéndose enlazar ambas con satisfactoria precisión.

Pero todo ello era sólo aplicable a casos aislados. Los geodestas sabían que necesitaban algo más alto que pudiera observarse desde cualquier sitio.

### **1.3. MÉTODOS DE NAVEGACIÓN**

Se desarrollaron dos métodos distintos de navegación de forma paralela: Navegación inercial y radiolocalización.

#### **1.3.1. Sistemas inerciales**

Se basa en el principio de inercia y en la relación existente entre las aceleraciones y la posición. Se usan acelerómetros y giroscopios para medir los cambios de velocidad y dirección. Conociendo la posición inicial de partida, se puede determinar la posición relativa.

Presentan la ventaja de que son independientes del exterior; son autocontenidos. No se pueden interferir y por eso se han usado para guiado de misiles y torpedos, así como de referencia auxiliar para misiles, buques y aviones de guerra. El principal inconveniente es que el error es acumulativo por lo que las prestaciones del sistema empeoran a medida que pasa el tiempo. Se pueden cometer errores de hasta 2 Km. por hora de vuelo.

#### **1.3.2. Radiolocalización**

Los sistemas de radiolocalización se basan en la obtención de unas líneas de posición midiendo la diferencia en los instantes de llegada de ondas transmitidas por estaciones emisoras sincronizadas y de posición conocida: La intersección de esas líneas determina la posición sobre la superficie terrestre

El geoposicionamiento utilizando ondas de radio Para mediar distancias, fue utilizado por primera vez a finales de años 40, durante el transcurso de la Segunda Guerra Mundial.

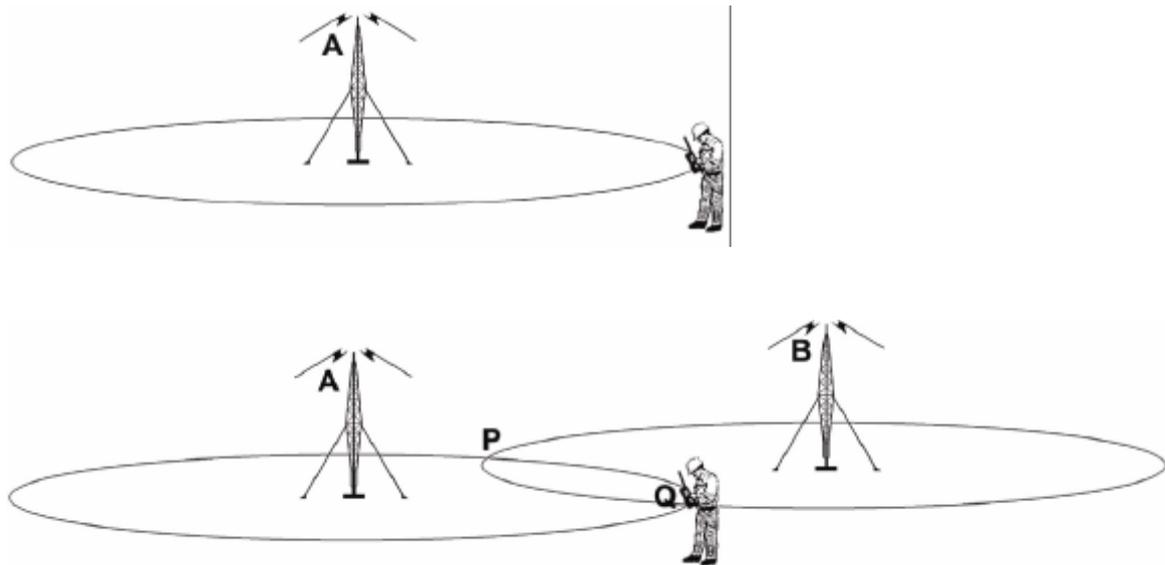


Figura 2: Esquema del radioposicionamiento, midiendo distancias a las estaciones, y por trilateración se calcula la posición actual.

Este sistema denominado HIRAN ("High RANging"), determinaba la Posición de aviones mediante un proceso de trilateración electrónica (medida de los lados por interferometría "doppler").

Otro sistema fue el Loran (Long Rang Navigation) desarrollado en el MIT durante la II Guerra Mundial para guiar los convoyes en el océano Atlántico en condiciones meteorológicas adversas y proporcionaba una cobertura de hasta 1200 Km. en el mar. Su funcionamiento se basaba en la emisión de pulsos sincronizados desde varias emisoras separadas y conocidas. Fue el primer sistema de navegación para todo tipo de clima y posición. La precisión ofrecida era de 1.5 Km. Tras la guerra se adoptó para fines pacíficos en la guardia costera y se pasó a llamar Loran-A.

Después se desarrolló un sistema de cobertura global con pocas estaciones transmisoras: el sistema Omega. La precisión de este sistema era muy pobre.

Apareció luego un sistema mejorado a partir del Loran: el Loran-C con el cual se obtienen precisiones aceptables de hasta 100 metros en condiciones atmosféricas ideales.

## **1.4. SISTEMAS BASADOS EN SATÉLITES**

### **1.4.1. Primeros satélites**

En un simposium científico celebrado en Toronto en septiembre de 1957, se presentó una comunicación sobre posibles aplicaciones geodésicas de hipotéticos satélites artificiales.

Actitud que, desde luego, no impidió que semanas más tarde, concretamente el 4 de octubre de 1957, la URSS pusiera en órbita el primer satélite artificial de la Tierra: el Sputnik 1.

El Sputnik 1 pesaba 83 Kg. emitió señales de radio durante tres semanas. Su órbita era bastante excéntrica, con altitudes entre 216 y 1136 Km. tenía un período orbital de 96 minutos.

Y la historia de la Geodesia espacial comenzó, porque pronto pudieron observar que, analizando el corrimiento Doppler de las señales radiodifundidas desde el Sputnik 1 y recibidas en estaciones de posición conocida, era posible establecer la órbita del satélite; una vez establecida, podía realizarse el procedimiento al revés y obtener la situación de un receptor en distinta localización, después de la recepción y análisis de las señales recibidas durante diferentes y suficientes pasos del satélite.

Este procedimiento, aplicado a emisiones no especialmente idóneas para los fines descritos, no ofrecía una elevada precisión, pero ponía de manifiesto la viabilidad de la aplicación. Posteriormente, esta técnica, ha sido una de las empleadas en muchos sistemas.

### **1.4.2. Generalidades sobre satélites**

Antes de empezar con la descripción de los sistemas que han sido, o son operativos, es conveniente hacer unas puntualizaciones sobre los tipos de satélites, el planteamiento general del posicionamiento por satélites, y ciertos aspectos de la propagación de las emisiones radioeléctricas.

A todos los sistemas de satélites, tras su etapa experimental, se les han ido buscando y encontrando aplicaciones, incluso diferentes de las originales, como posicionamiento, vigilancia, comunicaciones, Meteorología, Geodesia, Astronomía, Geofísica, Teledetección, etc.

Esto también ocurre también con los sistemas militares, que cuando son *desclasificados*, o sea, se divulga oficialmente información total o parcial sobre sus aspectos técnicos, la comunidad científica empieza a intentar usarlos con fines civiles.

### 1.4.3. Tipos de satélites

Los satélites pueden dividirse en dos clases: pasivos y activos. Los pasivos carecen de cualquier mecanismo y de emisiones propias; sólo pueden devolver la energía que en ellos incida, bien por simple reflexión o con prismas retrorreflectores. Los activos pueden tener luces pulsantes de alta intensidad, repetidores de microondas, transmisores radioeléctricos con modulaciones diversas, radioaltímetros, sensores remotos, etc.

También poseen el adecuado sistema de producción de energía, normalmente con placas fotovoltaicas o paneles solares; suelen tener baterías para almacenar la energía eléctrica y poder ser operativos cuando la Tierra eclipse la radiación solar. Pueden disponer también de elementos para su control y maniobra (combustible, motores cohete, etc.).

Resumiendo tenemos que con el advenimiento de la era espacial, iniciada en 1957 con lanzamiento del satélite ruso "Sputnik", la técnica de trilateración electrónica terrestre evolucionó hacia la trilateración espacial. En este caso las coordenadas de los radiofaros (satélites) son determinadas por las efemérides de estos satélites y calculadas a partir de las Leyes de Kepler, lo cual permite determinar parámetros orbitales consistentes e instantáneos.

### 1.4.4. Posicionamiento

El problema del posicionamiento por satélites es siempre el mismo: queremos obtener nuestra situación respecto al origen, o vector posición. Para ello debemos conocer la situación del satélite respecto al origen, o vector satélite, y obtener, a partir de nuestras observaciones, el vector observación entre el satélite y nuestra estación. Resumiendo: debemos conocer un vector y medir otro.

El vector satélite puede ser conocido si disponemos de las efemérides, permitiendo calcular su posición en función del tiempo. Las efemérides han de ser facilitadas por los operadores de la constelación, tras hacer su seguimiento desde ciertas estaciones terrestres de posiciones conocidas.

Para navegación, el vector observación ha de ser continuamente recalculado en tiempo real o inmediato.

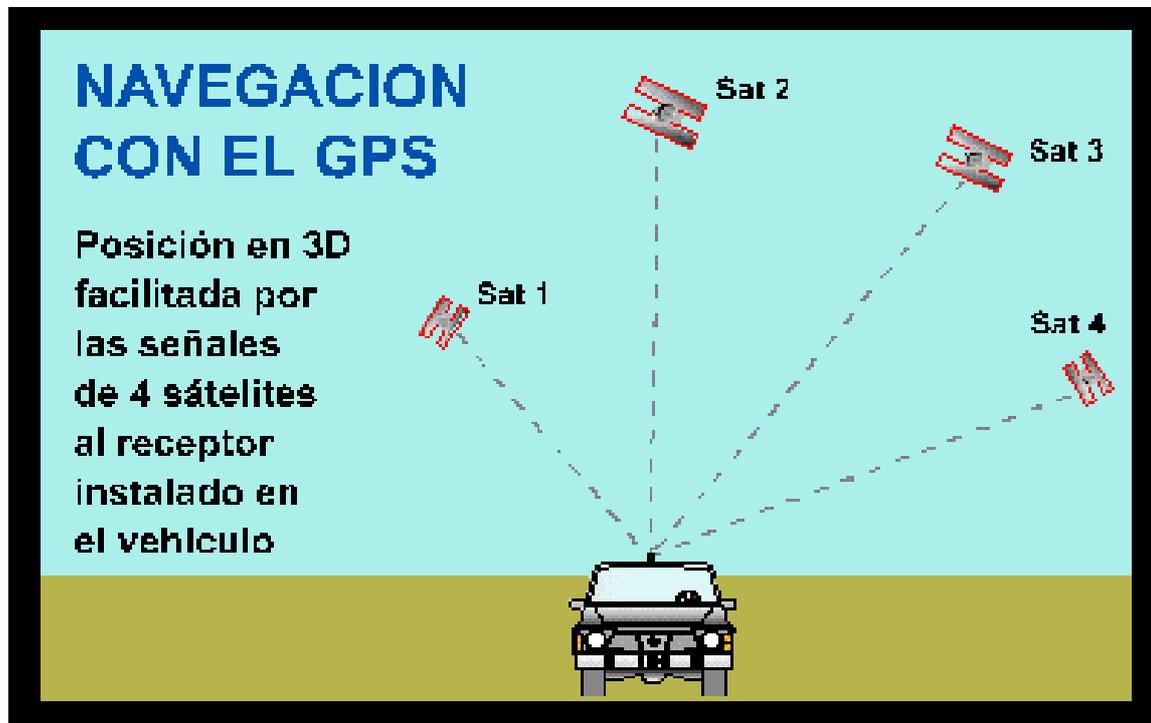


Figura 3: Navegación utilizando GPS.

El problema siempre puede invertirse: conocido el vector posición y el vector observación puede determinarse el vector satélite, y en sucesivas observaciones, los parámetros orbitales, que es lo que se hace desde las estaciones de control.

Para expresarlo de una forma elemental: si sabemos donde están los satélites, podemos situarnos; si sabemos nuestra situación, podemos situar los satélites (o determinar sus efemérides).

### 1.5. SISTEMAS ACTUALES

Los sistemas más conocidos en nuestro ámbito son: SLR, VLBI, TRANSIT (llamado genéricamente DOPPLER) y GPS.

El *SLR* (Satellite Láser Ranging) es un sistema de medida absoluta por láser a satélites.

La *VLBI* (Very Long Baseline Interferometry) permite calcular, por medios interferométricos, la distancia entre los centros radioelétricos de dos o más radiotelescopios que observen un mismo cuásar.

La constelación *TRANSIT* usa el método Doppler.

El GPS, puede trabajar en sistema Doppler, en medida directa de distancias absolutas, pseudo distancias o en comparación de fase de frecuencia de portadora.

## 1.6. SISTEMA SLR

El sistema SLR se basa en la medición de distancia a un satélite en función del tiempo de tránsito de un haz láser. Los satélites utilizados en este sistema son “pasivos”, ya que son simples esferas recubiertas de prismas de reflexión total como los usados para distancimetría electro-óptica, aunque hay otros satélites mixtos multifunción que, entre otros dispositivos activos, llevan prismas reflectores pasivos utilizables en este sistema.

El instrumento de estación está constituido por un potente láser pulsante, un reloj atómico, un contador, un fotodetector, la óptica necesaria, un ordenador y la infraestructura mecánica de estacionamiento y puntería.

Conocida la orientación y posición aproximada de la estación y las efemérides del satélite a observar, el ordenador calcula sus coordenadas topocéntricas locales para el momento de la observación.

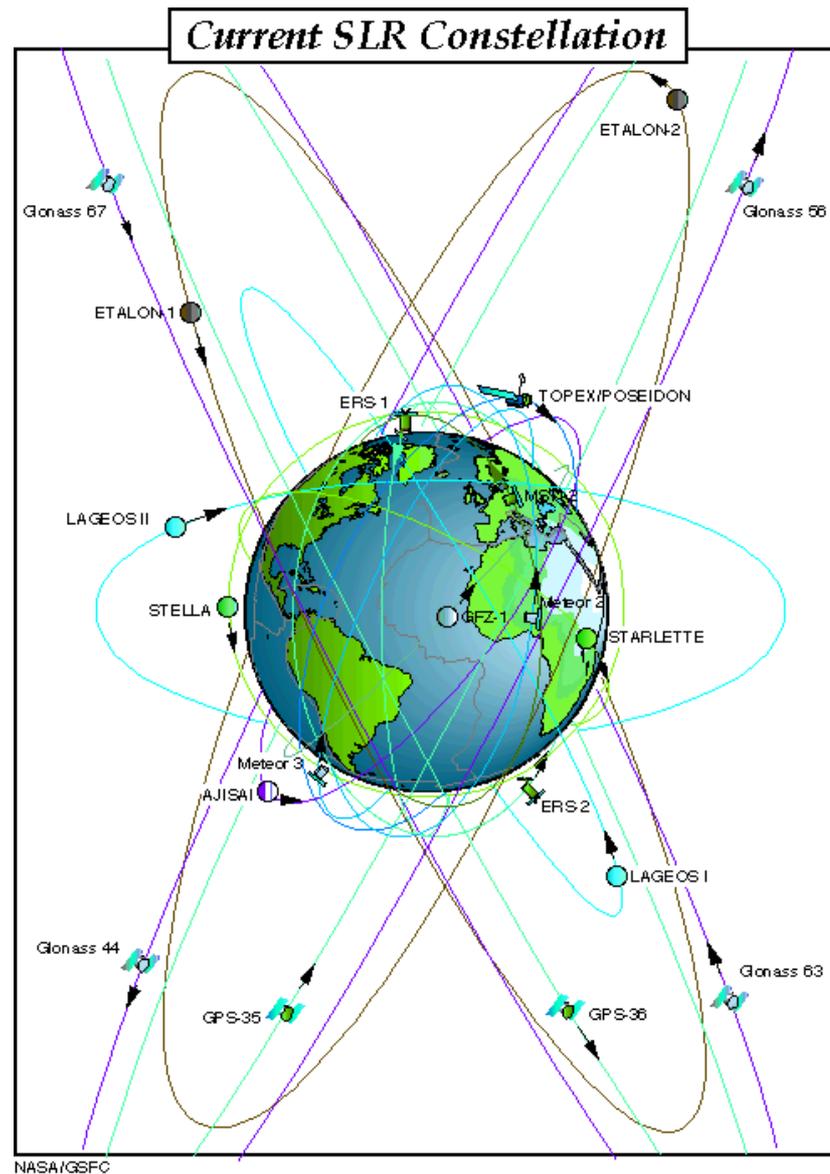


Figura 4: Constelación de Satélites SLR.

En el momento establecido, el láser produce un pulso que es enviado al satélite, a la vez que se empieza a contar tiempo con el reloj atómico. Al llegar el retorno se detiene la cuenta. En función del tiempo de tránsito y la velocidad de la luz, se calcula la distancia.

Los primeros láseres, que eran de rubí, han sido casi reemplazados por los YAG de Nd (cristal de Ytrio Aluminio Granate con iones de neodimio). Durante 150 picosegundos (lo que tarda la luz en avanzar media longitud de un cigarrillo) emite un pulso con casi 2 GW de potencia, la potencia eléctrica media que necesita una ciudad grande.

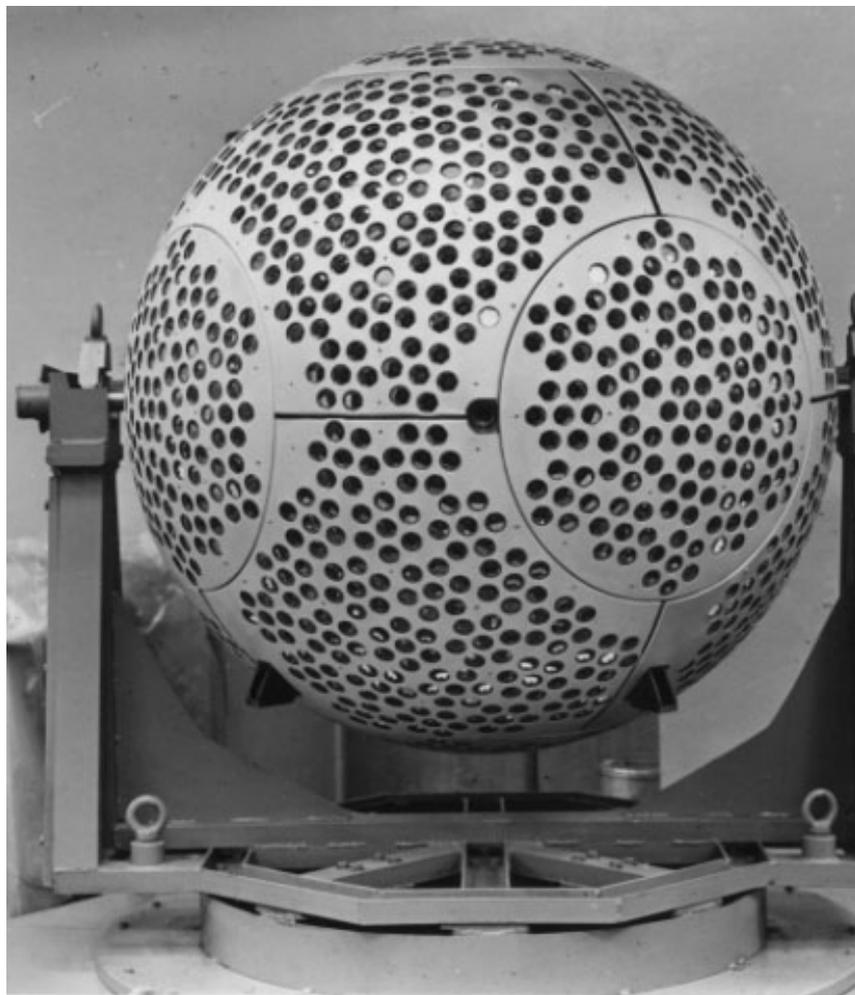
Hagamos la puntualización de que, aunque la energía emitida no es especialmente cuantiosa, al tender a cero su tiempo de emisión, su potencia tiende a infinito.

El pulso puede repetirse varias veces por segundo formando un bloque, y una observación puede consistir en varios bloques.

Las precisiones, que eran métricas en la primera generación de instrumentos, están actualmente a nivel de algunos centímetros.

Las correcciones a aplicar son: por movimiento relativo satélite-receptor durante el tiempo de tránsito y refracción troposférica.

No tienen con la ionosfera el problema del retardo propio de las señales radioeléctricas, pero a cambio exigen visibilidad directa.



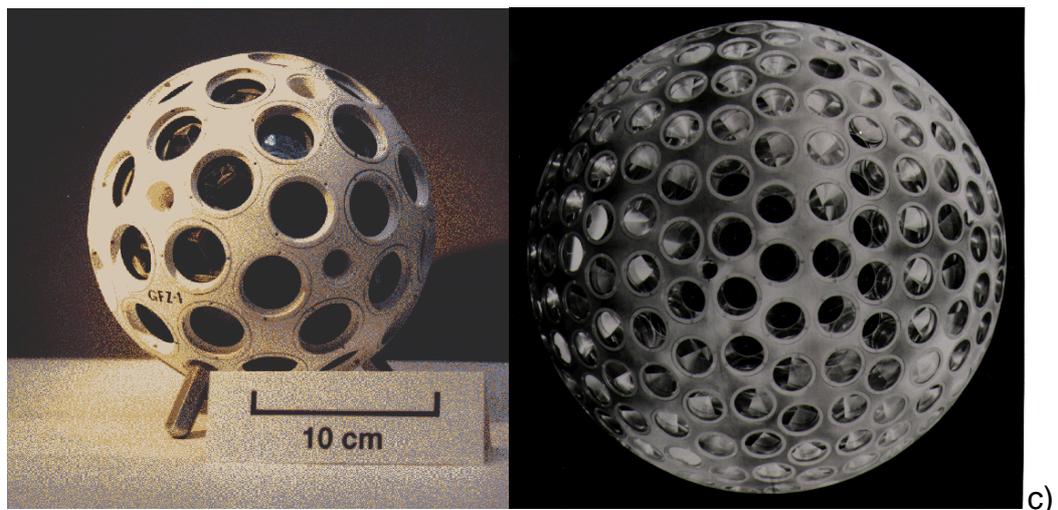
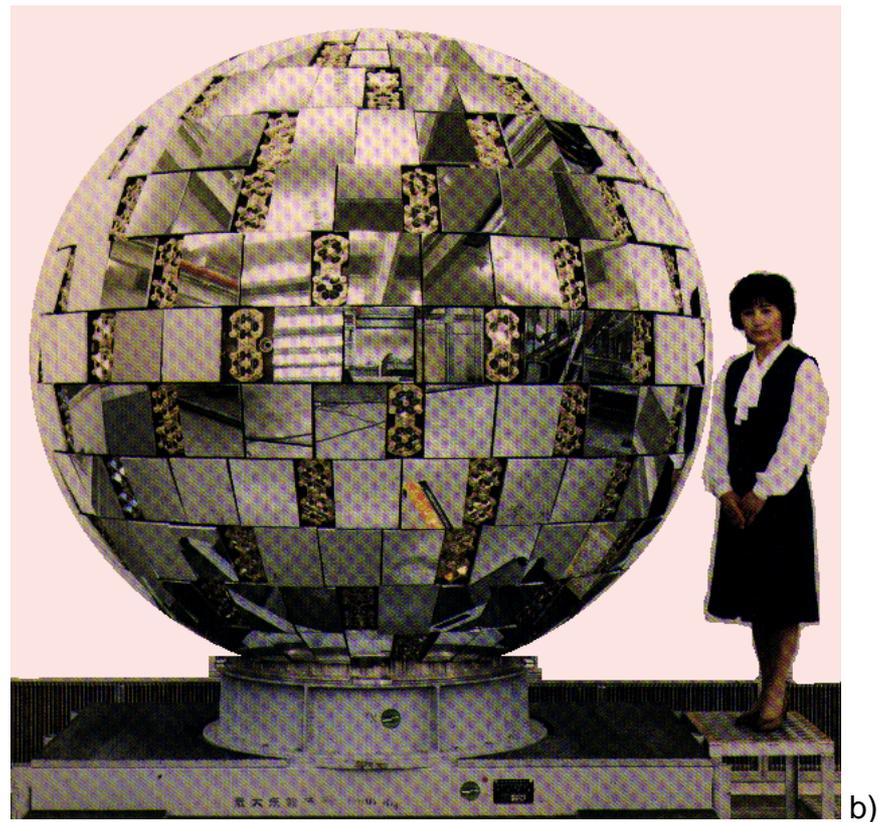


Figura 5: Satélites utilizados en el sistema SLR: a) Etalon (página anterior), b) Ajsai, c) Starlette y Lageos.

Como ya se ha dicho, los satélites utilizados suelen ser esferas pasivas recubiertas de prismas, como el LAGEOS (LAsEr GEOdinamic Satellite) de 60 cm. de diámetro, puesto en órbita en 1976 a 5900 Km., de altitud menor y en órbita más baja cabe citar al Starlette.

Otros satélites con capacidad SLR son los Explorer, Diadem, Peole, GEOS, AJISI, EGP, aunque pueden tener otras aplicaciones. Por ejemplo los GEOS (Geodetic Earth Orbiting Satellite), orientada su cara activa hacia la Tierra por mástil (o apéndice) y la actuación del gradiente de gravedad (efecto conjunto que podría definirse como «flotación gravitatoria»), poseen balizas ópticas o emisiones de destellos para técnicas fotográficas, prismas de reflexión total para retorno láser, repetidor de microondas para telemetría radar y transmisor continuo para conteo Doppler.

Las estaciones SLR son estacionarias y conforman una red mundial de 25.

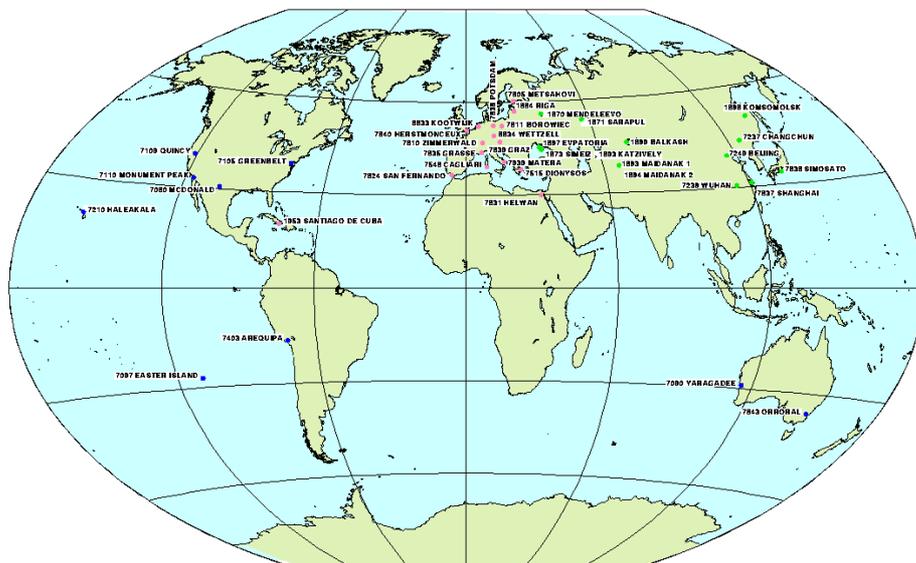


Figura 6: Red mundial de estaciones SLR.

Idéntica técnica se usaba en el LLR (Lunar Láser Ranging). Hacia 1973, cinco cajas o grupos de prismas se pusieron en la Luna por las misiones Apolo y Lunakhod y conforman aproximadamente un cuadrilátero de 1000 Km. de lado.

En esta técnica las exigencias eran muy severas, porque el pulso láser debía atravesar tres cuartos de millón de kilómetros, y más considerando que las precisiones alcanzadas eran del orden de 15 cm.

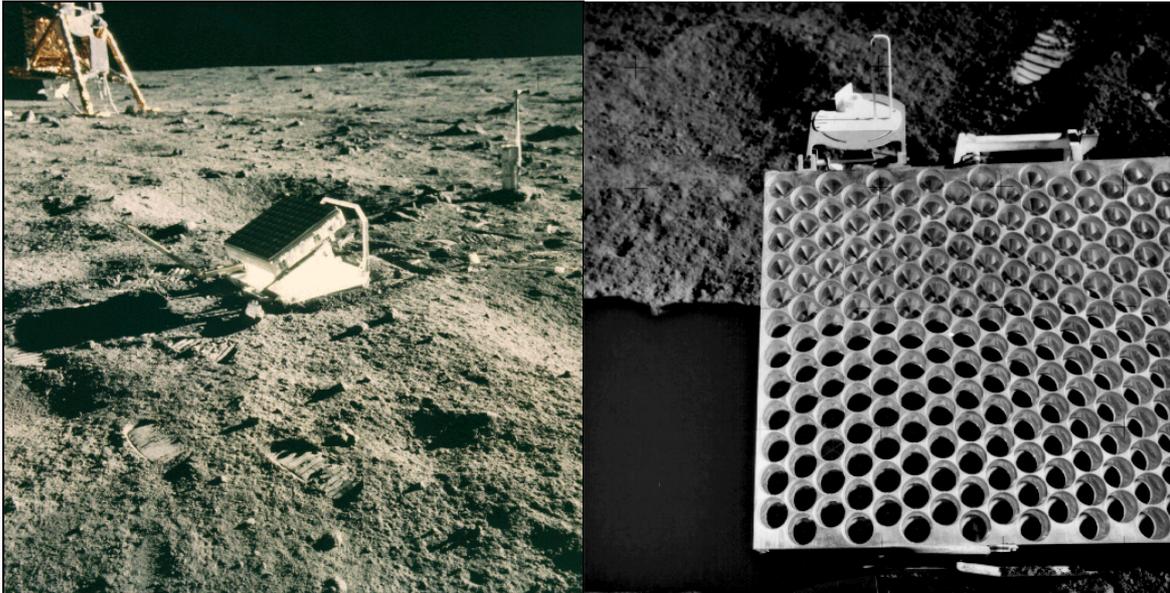


Figura 7: Prismas en la luna.

Es remarcable que por los grandes y bruscos cambios térmicos que se sufren, tanto en el espacio como en la superficie lunar, los prismas usados en estas técnicas son de cuarzo fundido, ópticamente perfecto y con coeficiente de dilatación virtualmente nulo.

La técnica SLR hizo decaer el interés por la LLR que, no obstante, hizo aportes significativos en la determinación de parámetros rotacionales de la Tierra y la Luna.

### 1.7. SISTEMA VLBI

La interferometría de línea-base muy larga, VLBI (Very Long Baseline Interferometry), descrita por algunos autores como *interferometría radioastronómica*, está plenamente operativa y constituye, con amplia diferencia, el más preciso de todos los sistemas de posicionamiento global.

Este sistema permite medir el vector que une los centros radioeléctricos de dos radiotelescopios que podrían estar en la Tierra hasta diametralmente opuestos, aunque no es habitual medir bases superiores a 10 000 Km.

Tanto la astronomía tradicional de observación a estrellas como todos los métodos de posicionamiento por satélite pretenden fijar la posición de uno o más puntos sobre la superficie terrestre, observando a puntos de posición conocida: satélites con efemérides disponibles o estrellas de la propia galaxia.

Pero si aumentamos la precisión, la posición de estos puntos de referencia empieza a mostrar indeterminaciones. Hasta las estrellas, «fijas» para los antiguos, resultan ya no ser tan «fijas». Es como si navegando quisiéramos fijar nuestra posición respecto a las luces de situación de otras barcas, ancladas en situación, aproximadamente bien conocida, pero no del todo inmóviles.

Necesitamos un marco de referencia más lejano y estable. Desde un punto de vista marino, serían los faros de costa; en Geodesia espacial se han podido emplear los cuásares, radiofuentes naturales.

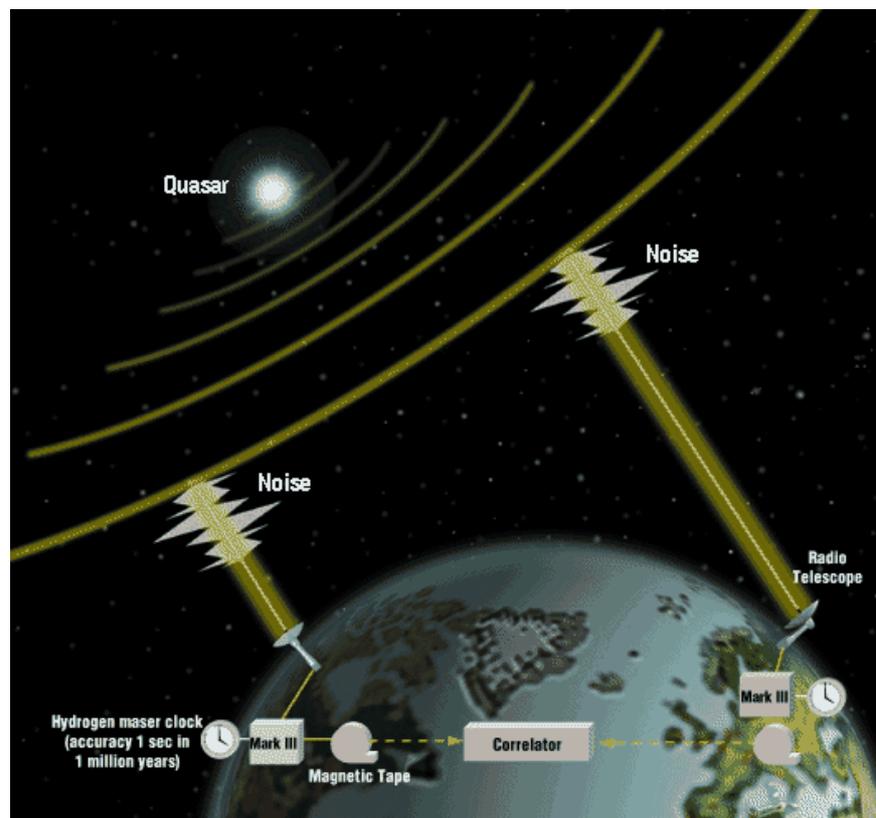


Figura 8: Esquema del funcionamiento VLBI

Las radiofuentes naturales existentes en el espacio pueden ser Galácticas o extragalácticas. Las radiofuentes Galácticas pueden ser planetas (con turbulencias atmosféricas), estrellas normales o pulsares (estrellas de neutrones). Las radiofuentes extragalácticas pueden ser nubes de gas, galaxias, galaxias en colisión, radio galaxias y cuásares.

Los cuásares son lejanísimos (hasta 9000 millones de años luz), lo que se ha determinado por su desplazamiento hacia el rojo, que supone velocidades radiales de fuga de hasta 40 000 km/s.

El término *CUASAR* (QUASAR) es una abreviatura de *CUASi esteIAR* (QUASi-stellAR).

Dada su situación en los márgenes del universo, han de radiar con potencia tan inimaginable, que, hasta hace poco, ha habido sectores científicos que rechazaban la existencia de estos cuerpos por ser teóricamente imposibles.

Fueron descubiertos en 1963 observando su radioemisión en longitudes de onda decimétrica y centimétrica. Para la VLBI, la técnica se practica con al menos dos radiotelescopios que pueden ser, desde el fijo de 300 m de diámetro de Arecibo, hasta el portátil de 4 m de JPL (Jet Propulsion Laboratory), aunque normalmente las observaciones se hacen con los radiotelescopios estacionarios orientables corrientes, con diámetros del orden de 50 a 100 m.



Figura 9: Radiotelescopio VLBI

Los dos o más radiotelescopios se orientan hacia un cuásar concreto. La señal recibida es referida a un patrón atómico local y registrado digitalmente en soporte magnético. Ambos registros se envían a un centro en el que se

correlacionan, pudiendo determinarse en cada momento el retardo entre la llegada del frente plano de la señal a un radiotelescopio y la llegada al otro. Este retardo permite establecer la componente del vector que une ambas estaciones, en la dirección de llegada de la señal.

Se hacen múltiples determinaciones a diferentes- cuásares.

La técnica VLBI arranca en 1977 cuando el Servicio Nacional de Geodesia de EE.UU., tras los trabajos del Instituto de Tecnología de Massachussets y del Centro Goddard para Vuelos Espaciales, estableció tres observatorios para medidas exclusivamente geodésicas.

Desde 1984 la técnica se ha desarrollado y expandido, habiendo en la actualidad radiotelescopios dedicados a esta técnica en todo el mundo.



Figura 10: Los puntos rojos en el planisferio, muestran la posición de algunas Antenas VLBI, que toman parte en mediciones geodésicas VLBI.

La VLBI tiene otra posibilidad de trabajo: la radio interferometría entre elementos conectados CERI (Connected Element Radio Interferometry), que es idéntica a la original VLBI, salvo que en vez de referir las señales recibidas a sendos osciladores atómicos locales, que tras su correlación posterior permiten

acceder a una escala de tiempos común, se conectan ambos receptores, trabajando en una base común de tiempos.

Se han hecho trabajos en EE.UU. y Gran Bretaña entre radiotelescopios interconectados por microondas, con separaciones entre 2,9 y 35 Km.

Estas técnicas permiten el establecimiento de una red mundial, increíblemente precisa, que actualmente constituye un marco de referencia absoluto.

Entre sus aplicaciones geofísicas cabe citar el control de derivas continentales a nivel centimétrico. Con casi igual precisión puede establecer el movimiento del polo, y la duración del día se establece con precisión de fracciones de milisegundo.



Figura 11: Estudios sobre medición de movimientos tectónicos realizados con la tecnología VLBI. (Deriva de los Continentes).

La técnica es tremendamente compleja: se sufren corrimientos Doppler en la recepción de las señales, y hay que corregir por aberración diurna, presión, nutación, diferencias sistemáticas en los patrones de frecuencia y por retardo troposférico e ionosférico. Mientras tanto, al rotar la base interferométrica en el espacio, la componente que se determina en la dirección de la radiofuente observada es variable en orientación en función del tiempo.

El efecto del retardo ionosférico se controla usando las mencionadas dos frecuencias en la banda S y la X.

También han de considerarse factores como la curvatura gravitacional del espacio solar y otros efectos relativistas, o la flexión y deformación por gravedad y

temperatura de cada antena receptora, que cambia de situación el centro radioeléctrico al que se refieren las observaciones, así como la posible geodinámica local, no necesariamente óptima, ya que la ubicación de los radiotelescopios se establece principalmente con criterios de apantallamiento natural de perturbaciones radioeléctricas, preferentemente en zonas hondas rodeadas de alturas que formen como un circo.

### 1.8. SISTEMA TRANSIT

Una constelación de satélites artificiales puesta en órbita con la finalidad específica de geoposicionamiento por ondas electromagnéticas emitidas por satélites, fue el sistema NNSS / TRANSIT (Navy Navigation Satellite System) que utilizó los satélites norteamericanos de la constelación *TRANSIT* (1960, operativo desde 1964).

Este sistema nació con un diseño de la Universidad John Hopkins para la U.S. Navy estadounidense en 1958, para ayuda de navegación a navíos, y sobre todo, para poder ser utilizados por submarinos atómicos lanzadores de misiles. Para hacer un lanzamiento con éxito es esencial que el submarino lanzador conozca su posición exactamente

También fue ampliamente utilizado para aplicaciones geodésicas en el mundo entero. Estaba compuesto por 8 satélites activos con un peso de sólo 61 Kg. en órbitas polares elípticas (casi circulares), con una altitud media de 1100 Km. con un Período orbital de 107 minutos.

Este sistema fue el predecesor inmediato del GPS. De hecho se mantuvo activo hasta mediados de 1993.

El sistema funciona midiendo el desplazamiento o corrimiento Doppler (Doppler shift) que es la variación aparente en el valor de la frecuencia en función de la velocidad de acercamiento o alejamiento de la fuente emisora.

El efecto Doppler-Fizeau fue descubierto en el siglo XIX. Cuando la fuente emisora de un tren de ondas, sean ópticas, acústicas o radioeléctricas, disminuye su distancia a un observador, la frecuencia recibida es aparentemente mayor que la real. Si la fuente se aleja, la frecuencia es menor, y si la distancia permanece constante, la frecuencia coincide.

En este sistema los satélites siguen una órbita baja y transmiten continuamente una misma frecuencia. Debido al movimiento orbital, desde tierra

se perciben unos desplazamientos Doppler de la señal. Conociendo las coordenadas y esas desviaciones de frecuencia se puede conocer la posición del observador

El Bloque Soviético tiene un sistema equivalente llamado *TSICADA*.

El sistema, como un todo poseía dos grandes problemas:

- No proporcionaba una cobertura mundial total
- Había un lapso de tiempo considerable entre las pasadas sucesivas de los satélites para un mismo punto en la Tierra.

De hecho, para obtener una posición precisa, se necesitaban de dos a tres días estacionados en un mismo punto, para obtener las coordenadas de ese Punto con un desvío padrón de 10 a 3 metros para posiciones asoladas y de cerca de 1 metro, usando técnica de translocación.

Como dijimos el inconveniente principal es que la medida es lenta y hay que esperar a que el satélite pase por encima del área en la que se está (hasta unos 30 minutos). No es válida para vehículos móviles como aviones, misiles, etc.

Es remarcable que el sistema Doppler permitió, tras casi 100 años de lentos progresos en la Geodesia, una nueva y más precisa determinación de la forma de la Tierra.

Actualmente, destacan el sistema europeo de satélites de navegación Marecs (1981), destinado a mejorar las comunicaciones e incrementar la seguridad de la navegación marítima.

## **CAPÍTULO II**

### **CONSTITUCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA GPS**

#### **2.1. INTRODUCCIÓN**

En 1963 la Fuerza Aérea de los EE.UU. inició un ambicioso proyecto conocido por "Proyecto 621B" para desarrollar un sistema de navegación tridimensional basado en satélites artificiales.

Poco después la Marina de los EE.UU. emprendió otro proyecto similar conocido como "Timation". Ambos proyectos convergieron finalmente en el sistema NAVSTAR-GPS, el 17 de Agosto de 1974.

El objetivo inicial era la consecución de un sistema exclusivamente militar, pero el excesivo coste obligó a que se permitiera el uso civil del sistema para que fuera aprobado el presupuesto por el Congreso de los EE.UU. (El coste final del proyecto ascendió a unos 10.000 millones de dólares).

El Sistema NAVSTAR / GPS fue desarrollado para sustituir el sistema TRANSIT.

Esta sustitución tenía que ser realizada para posibilitar la corrección de los dos grandes problemas del NNSS, ofreciendo en cualquier punto de la tierra y a cualquier hora del día, respuestas para tres preguntas básicas:

- a) ¿Cuál es la posición?
- b) ¿En que tiempo se está trabajando?
- c) ¿Cuál es su dirección y velocidad?

Las respuestas precisas, en tiempo real, debían ser decodificadas por receptores para aplicaciones militares.

En 1973 el JPO ("Joint Program Office") subordinado al Comando de la División de Sistemas Espaciales de la USAF ("United States Air Force) recibió la misión del DoD ("Department of Defense") de establecer, desarrollar, testar, adquirir y emplear un sistema de posicionamiento espacial para aplicaciones militares, capaz de generar una red de coordenadas para misiles, tomando en cuenta el proyecto de "Guerra de las Galaxias".

El sistema de posicionamiento global NAVSTAR / GPS (Navigation System Using Timing and Ranging / Global Positioning System) es el proyecto espacial más caro de la historia de la humanidad y fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los EE.UU. Su finalidad era meramente militar, y perseguía dotar a las tropas y dispositivos militares de una referencia espacial y temporal precisa. Se trata de un sistema de posicionamiento perfecto que ofrece servicio en toda la superficie del planeta y durante 24 horas al día.

La serie se inició con el lanzamiento un sólo satélite, el 22 de febrero de 1978. En 1986 se dio luz verde al desarrollo completo del sistema y aunque en 1991 el sistema NAVSTAR-GPS aún no estaba operativo al 100% demostró su potencialidad en la Guerra del Golfo Pérsico que constituyó un campo de pruebas inmejorable. El enorme éxito que obtuvo el sistema en aquel conflicto (el mundo entero se sorprendió de la precisión con que se dirigían los misiles a sus objetivos) aceleró el desarrollo final del proyecto.

### **2.1.1 Definición**

**GPS:** Global Positioning System, sistema de posicionamiento con satélites, que desde sus orígenes en 1973 ha supuesto una revolución frente a las técnicas utilizadas en Geodesia Clásica. Mediante el tratamiento de los observables GPS, que consisten en medidas de fase, tiempo y pseudodistancias, se puede conocer la posición en post-proceso de la antena del receptor, que vendrán dadas en el sistema de referencia WGS 84, por lo que habrá que realizar una transformación de este sistema al sistema de referencia local que se precise

## **2.2. SERVICIOS OFRECIDOS POR EL SISTEMA GPS**

Las características del sistema GPS se pueden agrupar en unos pocos puntos:

- Determinación de la posición tridimensional. Con tres coordenadas: latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar, o cualesquiera.
- Determinación tridimensional de la velocidad.
- Determinación del tiempo exacto con un error de un microsegundo.
- Cobertura global las 24 horas del día.
- Alta fiabilidad.
- Independencia de transmisores terrestres.

- Gran precisión en todo tipo de condiciones atmosféricas.
- Evaluación de la precisión conseguida.
- Versátil y válido para todo tipo de usuarios.

El sistema GPS es capaz de precisiones asombrosas: en teoría se podría conocer la situación con un error de 3 cm. mediante técnicas de enganche en fase. Para vehículos estas técnicas son complejas de conseguir, por lo que se usa el método "estándar" de enganche al código transmitido; de esta manera se podrían conseguir precisiones de 3 metros.

La generalización del acceso a esta precisión supone un compromiso para la seguridad nacional, por lo que se procedió a modificar el sistema en varios aspectos.

Para adaptar el sistema GPS a los usuarios civiles se crearon dos tipos de servicio:

SPS (Standard Positioning Service)

PPS (Precise Positioning Service)

La diferencia entre ambos es que el SPS permite 10 veces menor precisión y fiabilidad que el PPS. Ésta limitación es inherente al sistema.

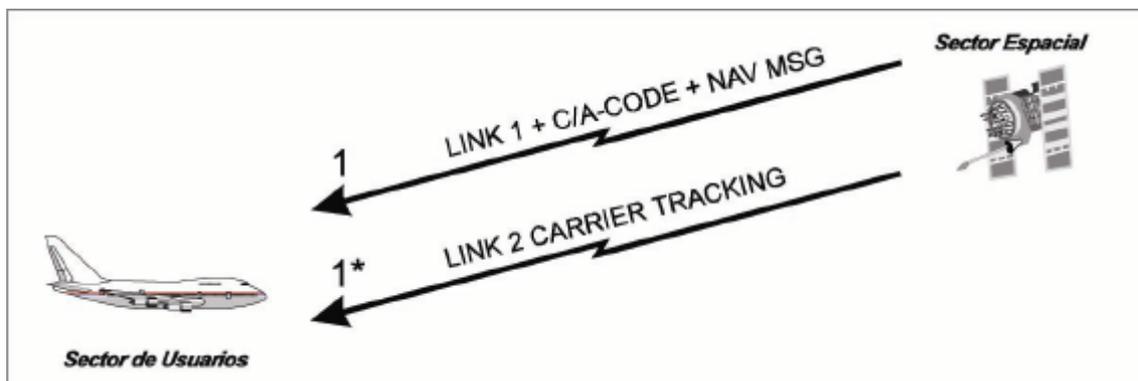


Figura 12: SPS orientado a uso civiles.

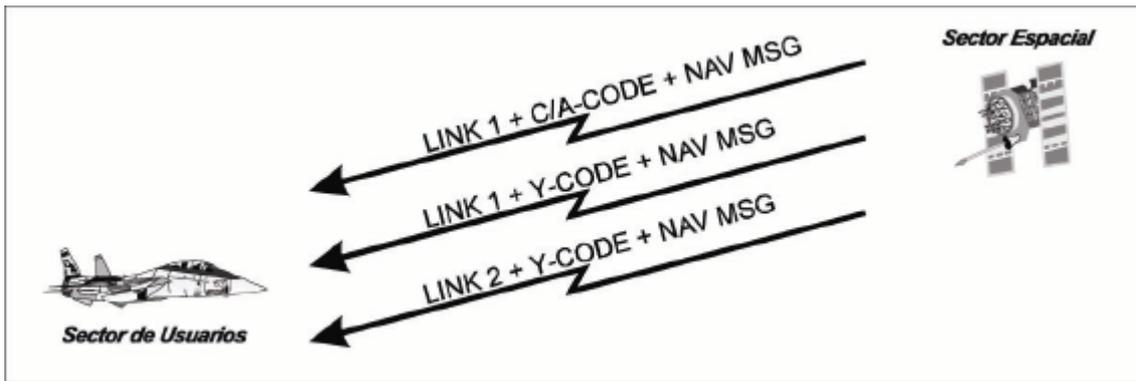


Figura 13: PPS orientado a usos militares.

Las primeras pruebas demostraron que el sistema era mejor de lo que se diseñó en un principio, por lo que se decidió empeorar las características de forma premeditada transmitiendo información falsa desde los satélites para permitir una precisión en el servicio SPS de unos 100 metros el 90% del tiempo, lo que es suficiente para navegación pero no para dirección de armas.

### 2.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GPS

A continuación vamos a describir las generalidades del sistema GPS y sus características más importantes. Para ello, debemos dividir el sistema en tres sectores fundamentales y dependientes entre sí, el sector espacial, el sector de control y el sector de usuarios.

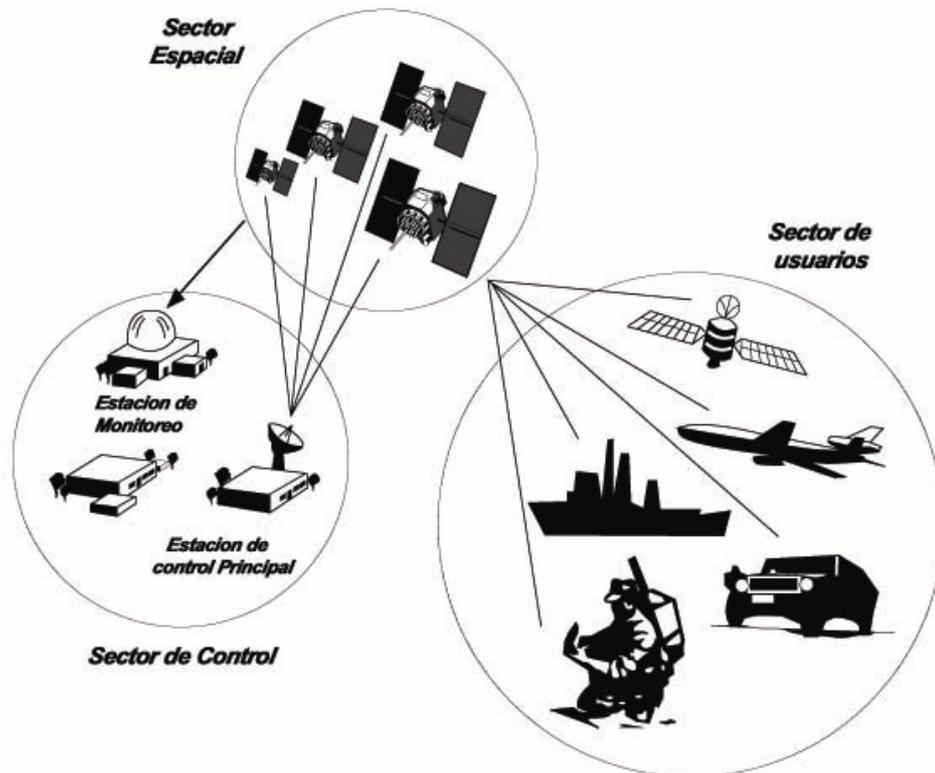


Figura 14: Esquema de los Sectores constitutivos del Sistema GPS.

## 2.4. SECTOR ESPACIAL

En el sistema NAVSTAR-GPS, como es común en los sistemas de satélites, se pueden distinguir varios "segmentos" que agrupan a los elementos con características comunes.

Cada uno de los segmentos son claramente distintos y tienen responsabilidades y objetivos distintos. El segmento más costoso es el segmento espacial, mientras que el responsable de que todo se ajuste a lo planificado es el segmento de control. Al final el segmento de usuario es el que recoge a los "clientes" que son el objetivo final de todo el sistema. Son los que se benefician de las estimaciones de posición para una gran multitud de aplicaciones.

Los satélites disponen de cuatro paneles solares y su masa en órbita es de unos 1667 Kg. La energía eléctrica se obtiene de paneles solares (auxiliadas por baterías recargables para los periodos de oscuridad) que proporcionan 600 W.

Los satélites del segundo bloque, lanzados tras 1992 tienen la posibilidad de enlaces transversales entre ellos, permitiendo la intercomunicación entre satélites.

Disponen de cohetes propulsores para corregir su posición orbital durante su vida útil.

Cada satélite lleva relojes atómicos de Cesio y Rubidio, La sincronización de los relojes y de las frecuencias del sistema GPS se realizan desde el Segmento Terrestre del sistema.

Como dato curioso es que dada la extrema exactitud precisada, hay que considerar los efectos relativistas provocados por la gran velocidad de los satélites y por la diferente gravedad existente a 20169 Km. de la Tierra.

Relatividad Especial: Debido a la velocidad relativa entre los relojes de la Tierra y los que están en los satélites, el reloj del satélite observado desde la Tierra va más lento de lo previsto.

Relatividad General: El satélite está situado en un campo gravitatorio más tenue que en la Tierra, por lo que su reloj irá levemente más rápido que en la Tierra.

Ambos efectos se cancelan si la órbita tuviera un radio 1.5 veces el radio terrestre, pero como es de casi 4 veces, los relojes de los satélites van más rápido que los terrestres. Si no se corrigiera ese efecto habría desfases de 38 microsegundos cada día, lo que provocaría un error en la posición de 11 Km.

Actualmente, la puesta en servicio de cada satélite lanzado con los Delta se hace en varias fases: La primera y segunda etapa del cohete, ambas de propelente sólido, sitúan la tercera etapa y su carga útil (satélite) en una órbita elíptica.



Figura 15: Cohete Delta utilizado para colocar en órbita a los satélites GPS.

Activando la tercera etapa se aumenta el apogeo de la órbita hasta el valor final de 20 180 Km. de altitud,

Se desensambla y desecha entonces la tercera etapa, ya inútil, y se activa el cohete *de inserción* que lleva el propio satélite, entrando en una órbita casi definitiva, que finalmente se retoca con los cohetes de maniobra del satélite hasta establecer la órbita de servicio. Allí es sometido a las necesarias pruebas y manipulaciones por el centro de control. En un plazo de 30 a 45 días, el satélite es activado, ya en la órbita y posición de servicio previstas, y se declara operativo.

Existen otros satélites en órbitas de aparcamiento, desactivadas y disponibles como reserva («spares»).

Cada órbita o plano orbital se identifica por una letra. Los planos orbitales son: *A, B, C, D, E* y *F*; cada posición del satélite en la órbita se identifica por un número. Las posibles posiciones de un satélite de servicio en una órbita son: 1, 2, 3 y 4.

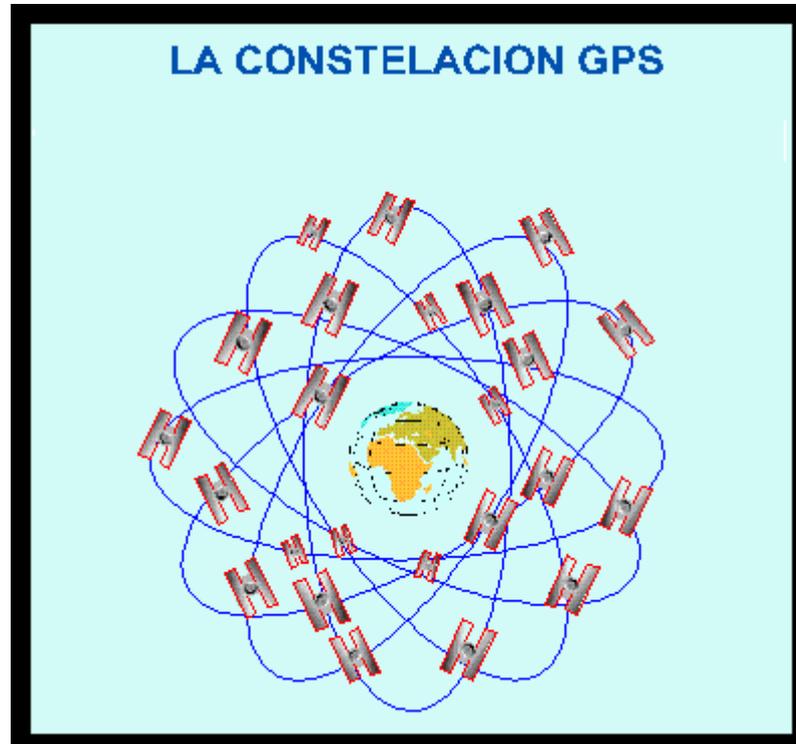


Figura 16: Disposición esquemática de la configuración orbital de los satélites GPS. 6 orbitas de 4 satélites cada una.

Evidentemente las combinaciones de los planos orbitales *A, B, C, D, E* y *F* con las posiciones orbitales 1, 2, 3 y 4, nos ofrecen las 24 posibles ubicaciones de cada uno de los satélites previstos.

#### 2.4.1. Satélites

Los satélites de la constelación NAVSTAR son identificados de diversos modos:

- Por su número NAVSTAR (SVN).
- Por su código de ruido seudo aleatorio (PRN). En los códigos que transmiten que identifican a cada satélite de la constelación.
- Por su número orbital. Un ejemplo sería el satélite 3D, que corresponde al satélite número tres del plano orbital D.

2.4.1.1. Satélites del bloque I: Pesan cerca de 845 Kg. y miden en tomo de 5 metros con los paneles solares abiertos, fueron lanzados 11 satélites de este bloque por los cohetes portadores ATLAS-F desde la base USAF de VANDERBERG - CALIFORNIA, durante el periodo de 1978 a 1985. Con, excepción de la falla de un "booster" en 1981, todos los otros entraron en operación satisfactoriamente. Tenían paneles solares con 400 vatios de potencia. De los 10 satélites operacionales que lo componían, 4 llevaban oscilador de cuarzo, 3 con reloj atómico de rubidio y 3 con reloj atómico de cesio. Su vida media fue de 5 años.

Hoy en día todos los satélites de este bloque ya fueron sustituidos.

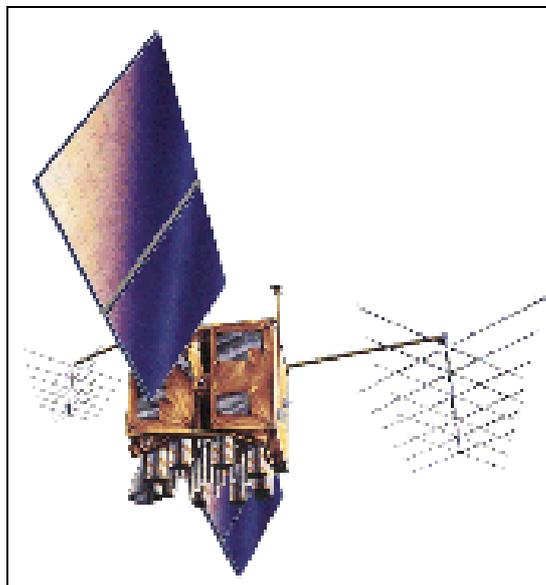


Figura 17: Satélite GPS del Bloque I

2.4.1.2. Satélites del bloque II: Los 28 satélites de este bloque Comenzaron a ser lanzados el 14 de febrero de 1989, desde el Centro Espacial Kennedy en la Base de la USAF de Cabo cañaveral en La Florida - EUA. Tenían un costo aproximado de USS 50.000.000 (cincuenta millones de dólares) Por unidad. Cada satélite de este bloque, tiene un peso de más de 1500 Kg. Todos incorporan osciladores atómicos.

Existe una importante diferencia entre los satélites de los bloques I y II. Los satélites del Bloque II fueron construidos de un modo que permite la degradación de la precisión obtenida por el Código de Acceso Libre (C/A) y la limitación de acceso al código de Precisión (P). Este hecho, impuesto por el DoD

para la apertura del sistema a la comunidad internacional, alteró drásticamente el mercado de receptores en todo el mundo, obligando a los científicos a desarrollar técnicas de geoposicionamiento que posibiliten dar una solución a estas restricciones.

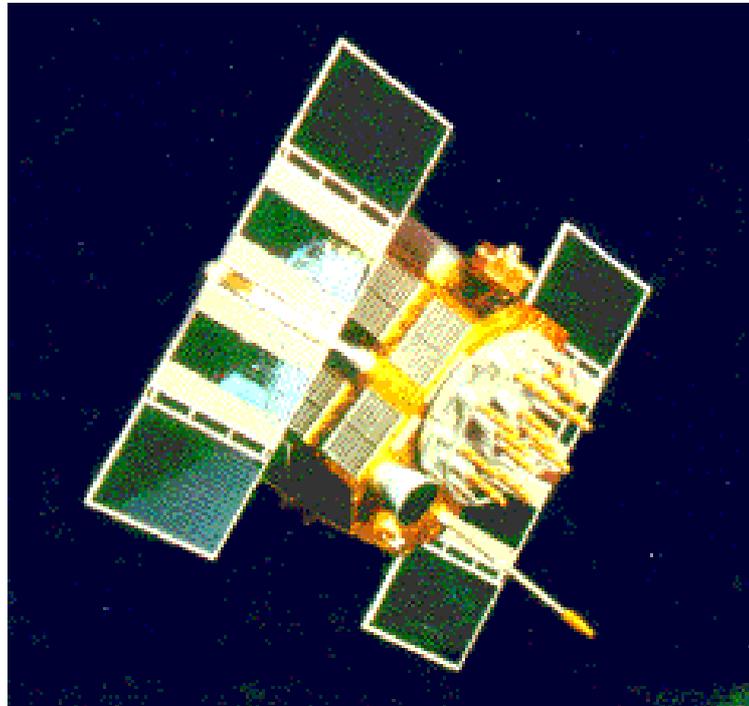


Figura 18: Esquema de un Satélite GPS correspondiente al bloque II

El 26 de noviembre de 1990 se lanzó el décimo satélite del bloque II, modelo mayor y más pesado (930 Kg.), que inauguraba una nueva serie, la II-A, que incorpora mayor ayuda para la navegación, varias mejoras de producción y una superior vida útil. También se inauguró un nuevo tipo de cohete más potente para lanzarlo: El Delta 2.

2.4.1.3. Satélites del bloque IIr: La denominación -R- se refiere a la palabra "Replacement" o sustitución. Los satélites del bloque IIr están planificados para ser un total de 32 unidades, comenzaron a ser lanzados a partir de 1995 por los transbordadores espaciales. Cada vehículo transportaría en principio, tres satélites reduciéndose así los costos operacionales de lanzamiento.

La gran novedad de estos satélites es la inclusión de un MASER a hidrógeno ("Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation" -

análogo del láser en la región visible del espectro electromagnético), lo que aumentará sensiblemente la precisión del reloj interno del satélite, permitiendo incluso una mayor penetración de la señal en la vegetación.

Tienen una serie de antenas emisoras que funcionan en la banda L del espectro, que son las encargadas de enviar a la superficie terrestre las señales que recibiremos. También tienen otra antena emisora receptora, operando en la banda S, para intercambiar información con el centro de control en tierra.

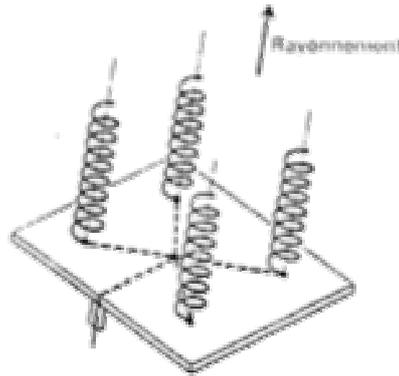


Figura 19: Esquema de la Antena de un satélite GPS

La vida útil de un satélite llega a término por envejecimiento o avería de los paneles solares, falta de capacidad de los acumuladores, averías no conmutables en los sistemas electrónicos, o agotamiento del combustible de maniobra y recuperación de órbita.

Anteriormente, con motivo del primer conflicto del Golfo Pérsico, a finales de 1987, la US Navy ya empleó el sistema GPS para navegar por un pasillo seguro, previamente determinado, en una zona minada entre las costas de Irán y la península de Arabia, en el estrecho de Ormuz, que comunica el golfo Pérsico con el de Omán. Realmente hay que tener más fe en el sistema para usarlo en aplicaciones como la descrita que para un apoyo fotogramétrico o la plácida medición de una base geodésica, por ejemplo.

Todos los satélites GPS disponen de osciladores atómicos de cesio, salvo algunos antiguos que lo tienen de rubidio. En el caso de los primeros la precisión es de  $10^{-13}$  s, mientras que en los de rubidio la precisión es de  $10^{-12}$  s. La frecuencia fundamental de emisión de estos osciladores es de 10,23 MHz.

Los relojes de los satélites del bloque 1 eran de menor fiabilidad que los actualmente empleados. Algunos tenían osciladores de cuarzo. Actualmente se

usan dos o cuatro osciladores atómicos por satélite (que pueden ser de rubidio o de cesio, uno de los cuales es seleccionado desde la Estación Maestra de Control para dar servicio.

El funcionamiento de un reloj atómico se basa en la transición entre niveles de energía de átomos concretos. La transición produce una oscilación de frecuencia muy precisa que se usa para controlar por realimentación (feedback) un oscilador piezoeléctrico de cuarzo, cuya frecuencia así estabilizada es la realmente utilizada, siendo normal ajustarla en valores redondeados: 10 MHz, por ejemplo.

El reloj u oscilador de servicio de un satélite GPS provee una frecuencia fundamental de 10,23 MHz sobre la que se estructura todo el conjunto de la señal radiodifundida por el satélite.

## **2.5. SECTOR DE CONTROL**

Está constituido por cinco estaciones de control repartidas alrededor del mundo y con coordenadas muy precisas. Todas ellas reciben continuamente las señales GPS con receptores de 2 frecuencias y provistos de osciladores de cesio, también se registran, de forma precisa, otra serie de parámetros como presión y temperatura que afectan de manera muy importante a la propagación de la información que se recibe de los satélites.

Las principales tareas de este Sistema de Control son: determinar de forma precisa la órbita de cada satélite; determinar por medio de modelos matemáticos la predicción de estas órbitas; sincronización permanente de los sistemas de relojes de los satélites; transferencia de datos actualizados de efemérides para cada "buffer" de los satélites; control de la degradación de la señal (S/A y A/S); corrección del posicionamiento de los satélites por comandos desde tierra; control de lanzamiento de nuevos satélites para, la manutención de la constelación.

### **2.5.1. Estación maestra de control**

En un inicio estaba situada en la Base de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos en VANDENBERG - CALIFORNIA, hoy en día le estación maestra se localiza en la Base FALCON de la USAF en COLORADO SPRINGS - COLORADO.

Esta estación, además de monitorear los satélites que pasan por los EUA, reúne los datos de las estaciones de monitoreo y campo, procesando y generando los datos que efectivamente son transmitidos a los satélites.

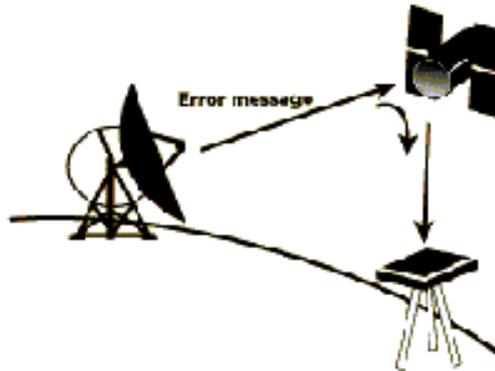


Figura 20: Estación Maestra de Control

Todos estos datos se transmiten a la estación principal situada en Colorado Spring (USA) en donde se procesa la información, obteniendo de esta manera todas las posiciones de los satélites en sus órbitas (sus efemérides) y los estados de los relojes que llevan cada uno de ellos para que con posterioridad los mismos satélites radiodifundan dicha información a los usuarios potenciales.

### 2.5.2. Estaciones de monitoreo

Existen cinco estaciones de monitoreo Incluyendo la estación maestra:

HAWAI -Pacífico oriental

COLORADO SPRINGS

ISLA DE LA Ascensión, en el Atlántico Sur

DIEGO GARCÍA, en el Océano Índico

KWAJALEIN, en el Océano Pacífico occidental



Figura 21: ubicación de las estaciones de monitoreo para el sistema GPS.

Estas estaciones, dotadas de receptores precisos, rastrean continuamente los satélites NAVSTAR calculando sus posiciones cada 1,5 segundos. A través de datos meteorológicos e ionosféricos, son modelados los errores de refracción y calculadas sus correcciones, que son entonces transmitidas a los satélites y de allí a los receptores en todo el mundo.

Todos los datos computados en estas estaciones son transmitidos a la estación maestra, a intervalos de 15 minutos durante todo el día.

Además de las estaciones oficiales, existen otras estaciones de carácter privado como la CIGNET "Cooperative International GPS Network", que con la internacionalización del Sistema GPS, conectan sus datos a la red oficial con la internacional red de datos norteamericana.

### 2.5.3. Estaciones de campo

Estas estaciones consisten en una red de antenas de rastreamiento de satélites NAVSTAR.

Esta red, tiene la finalidad principal de ajustar los horarios de cobertura de los satélites, controlar los errores de los relojes atómicos, permitir el cálculo de las correcciones de los mismos y sincronizar la marcación del tiempo de la Estación Maestra.

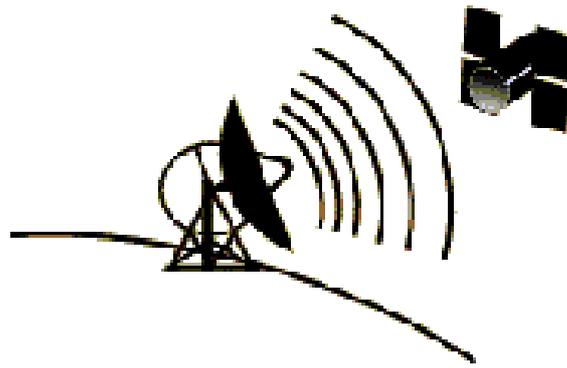


Figura 22: Estación de Campo

Estas estaciones de seguimiento (láser, radar y ópticas), tienen como objetivo específico la obtención de efemérides que no estén afectadas por la disponibilidad selectiva, denominadas precisas, y que están al alcance del usuario a través de organismos científicos como el IGS (International Geodynamic Service) o el NGS (National Geodetic Survey). Con ellas, tenemos la seguridad de posicionarnos en el sistema WGS84 con los errores típicos del sistema.

La precisión nominal de estas efemérides prevista, permite la determinación de la posición de un satélite con error menor de 1 m en sentido radial, 7 m a lo largo de la trayectoria y 3 m transversalmente.

La precisión final alcanzable depende de la exactitud de las efemérides.

Es posible usar efemérides calculadas a posteriori, llamadas efemérides precisas, obtenidas por observación de los satélites desde puntos de situación muy exactamente conocida, usualmente puntos con coordenadas obtenidas por sistemas VLBI o SLR.

## 2.6. SECTOR DE USUARIOS

El segmento de usuario consiste en los aparatos receptores sobre la Tierra, así como por el software necesario para la comunicación del receptor con el ordenador y el post-procesado de la información para la obtención de los resultados.

El equipo de usuario es un dispositivo pasivo en el sentido de que sólo recibe información de los satélites, cuya misión es obtener la señal de los

satélites, la demodulan y extraen la información de efemérides de los satélites, de correcciones, etc. y presentan la información al usuario final.

El sistema GPS permite que la localización de cada usuario la conozca solamente el usuario debido a que no se emite ningún tipo de señal, con lo que la privacidad del servicio se garantiza.

En el equipo se suelen incluir accesorios y pequeño material auxiliar, como acoplamiento de estacionamiento, trípode, placa de estacionamiento sobre pilar, cables especiales, cinta métrica, barómetro y sicrometro (para control meteorológico), etc., así como patrones exteriores de frecuencia y otros elementos, en aplicaciones especiales.

Los equipos están en continuo desarrollo y su evolución es comparable a la experimentada en informática durante las dos últimas décadas para los ordenadores personales, aunque probablemente más dinámica.

## **2.7. EQUIPO DE OBSERVACIÓN.**

Lo componen la antena, el sensor y la unidad de control o controlador.

### **2.7.1. Antena**

Es el elemento al cual viene siempre referido nuestro posicionamiento, está conectada a través de un preamplificador al receptor, directamente o mediante cable. La misión de la antena es la de convertir la energía electromagnética que recibe en corriente eléctrica que a su vez pasa al receptor.

El receptor consta de una serie de elementos que se encargan de la recepción de las radiofrecuencias enviadas por los satélites. Además suelen poseer diferentes canales para seguir simultáneamente a varios satélites, un procesador interno con su correspondiente soporte lógico, una unidad de memoria para el almacenamiento de la información, teclado de control, pantalla de comunicación con el usuario, diferentes conectores para funciones varias y una fuente de alimentación interna o externa.

La función de una antena es convertir una corriente eléctrica en una radiación electromagnética y viceversa. La antena (emisora) de los satélites hace lo primero y la de nuestros instrumentos (receptora) lo segundo.

La corriente eléctrica inducida en nuestra antena por las señales radiadas recibidas, posee toda la información modulada sobre ellas. Hay diversos tipos de antenas: dipolo, dipolo curvado, cónico-espiral, helicoidal, plana, etc.

El punto que realmente se posiciona es el centro radioeléctrico de la antena, que no suele coincidir con el mecánico o físico, generando un error residual por excentricidad que puede valer unos milímetros y es denominado en textos ingleses como *antenna phase center ambiguity*.

Casi todos los fabricantes recomiendan una orientación aproximada común para las antenas en caso de posicionamiento preciso relativo. Se trata de evitar este error, normalmente despreciable, pero que no hay por qué asumir, dada su fácil compensación; para ello el fabricante monta en el interior de todas las carcasas el elemento físico receptor en la misma posición respecto a alguna referencia exterior del conjunto.

Todas las antenas suelen llevar un plano de tierra que evite la recepción de señales reflejadas en el suelo u objetos cercanos que empeoran la precisión de observación

Cada tipo comercializado de antena tiene sus características, frecuentemente adaptadas a aplicaciones concretas que el fabricante especifica.



Figura 23: Equipo GPS, Antena + sensor

### 2.7.2. Sensor

Recibe los impulsos de la antena receptora, y reconstruye e interpreta los componentes de la señal, es decir, las portadoras, los códigos y el mensaje de navegación. En definitiva, lo que hace es demodular la señal original.

El proceso es el siguiente, el sensor correlaciona los códigos, es decir, lo compara con una réplica que él mismo genera, y de este modo halla el tiempo que ha tardado en llegar la señal al receptor, obteniendo la distancia al satélite multiplicando esa diferencia de tiempos por el valor de la velocidad de propagación de las ondas en el vacío (aproximadamente unos 300.000 Km. /s). como estas distancias están afectadas de errores, se las denomina pseudo distancias.

El sensor tiene unos canales de recepción, de doble señal si es un receptor bifrecuencia y de señal única si es monofrecuencia. Cada canal recibe las señales de un satélite diferente, y dependiendo del número de canales obtendremos mayor o menor información en un momento dado. Los receptores disponen de un reloj u oscilador que sincroniza los tiempos de recepción. Estos relojes suelen ser de cuarzo con una alta estabilidad, dando precisiones de  $10^{-7}$  s. Con ellos se obtiene el desfase respecto al tiempo GPS. Este aspecto es el que supone el añadir una incógnita en el cálculo posterior, que no es otra que el estado del reloj en cada época de grabación.

Es muy frecuente encontrar equipos de observación en los cuales el sensor y la antena forman un elemento único, lo que facilita el paso de información y agiliza el proceso, evitando los retardos que se producen en la transmisión por cable.

### 2.7.3. El Controlador:

Realiza las siguientes tareas:

- \* Controlar el sensor.
- \* Gestionar la observación.
- \* Almacenar los datos.

El buen manejo del controlador es fundamental en los procesos de observación, así como el conocimiento y aplicación de los parámetros adecuados en cada situación o necesidad.

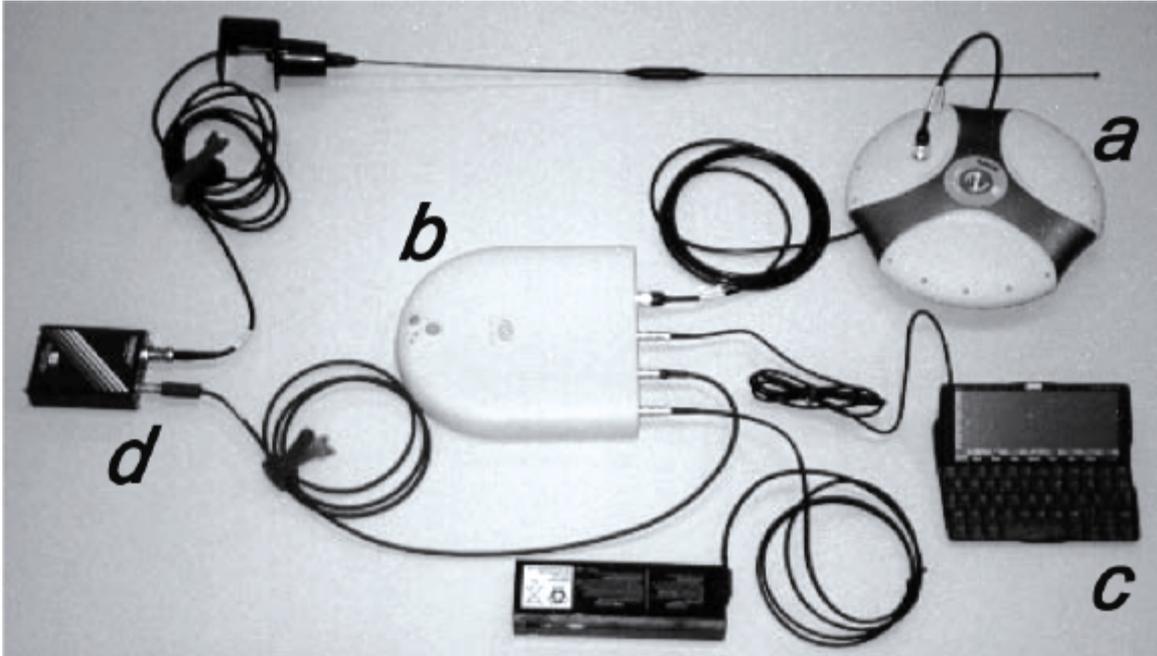


Figura 24: Equipo GPS, a antena, b sensor, c controlador, d equipo de radio

Los datos suelen ser grabados en unidades independientes de memoria o tarjetas RAM PCMCIA, que varían desde los 512 Kbytes a los 4 Mbytes de capacidad. También pueden ser almacenados directamente en un PC portátil conectado al receptor.

Es muy importante controlar la capacidad de grabación de datos y el tiempo de observación marcado.

Tras la observación se obtienen los siguientes datos:

- \* Mensaje de navegación.
- \* Efemérides radiodifundidas por los satélites.
- \* Almanaque de estado de los satélites.
- \* Fichero de observación.

Estos datos pueden ser volcados en un ordenador para ser tratados con un software de post-proceso, o bien tratados "in situ" por el mismo controlador si éste dispone de un software de proceso y así obtener los resultados en tiempo real.

El usuario debe saber que los datos citados anteriormente pueden ser transformados a un formato estándar independiente en modo ASCII para insertarlos y ser tratados por cualquier software de proceso de datos GPS. Este formato es el denominado RINEX, que en la actualidad ya figura como RINEX-2, con la posibilidad de incluir observaciones realizadas a través de la constelación GLONASS.

## 2.8. CLASIFICACIÓN DE LOS RECEPTORES GPS

### 2.8.1. Por el número de canales:

1) Monocanales - Poseen un único canal que se mueve de un satélite para otro. Poseen menos circuitos y son más baratos. Sin embargo son más lentos en la actualización de las coordenadas, más imprecisos y susceptibles a la interrupción del rastreamiento. ("cycle slip").

1) Multicanales (físicos o lógicos) - Con el aumento del número de canales, la capacidad de rastrear varios satélites de forma simultánea aumenta, lo que mejora la precisión y torna el receptor menos susceptible a "cycle slips".

### 2.8.2. Por el tipo de canal:

Secuenciales - En los receptores de canales secuenciales cada canal rastrea un único satélite por vez, saltando para el próximo tan pronto tenga almacenado datos suficientes para el cálculo de la posición.

Multiplexados - Son análogos a los secuenciales, con la diferencia que son capaces de moverse de un satélite para otro con mucha rapidez. Exigen circuitos más complejos y consecuentemente son más precisos y más caros.

### 2.8.3. Por el tipo de señal observado:

#### 1) Receptores de pseudo-distancia por el código C/A:

Estos receptores, generalmente leves y portátiles necesitan poca energía para su funcionamiento y hacen uso solamente del SPS. Son usados normalmente para la navegación (aérea, marítima y terrestre), posicionamiento grosero y DGPS cuando están adaptados para ello. Trabajando en el modo

DGPS pueden ejecutar la digitalización de superficies reales con precisiones en movimiento de 1 a 10 metros, en dependencia de la geometría de los satélites.

### 2. Receptores del código C/A y Portadoras L1 y L2:

Son receptores geodésicos que exigen post-procesamiento para el cálculo de coordenadas, precisas. Son utilizados siempre en pares para la determinación de "líneas de base".

(Obs.: "Líneas de Base" son los vectores AX, AY, AZ entre las estaciones donde se localizan los receptores GPS). Poseen relojes internos de alta precisión, motivo por el cual garantizan precisiones de orden centimétrico en la determinación de la posición. Determinan velocidades muy precisas. Son más robustos que los receptores de pseudo-distancia, y poseen puertos RS-232 para la conexión con microcomputadoras. Son muy caros y exigen personal habilitado para su operación. Constituyen excelentes equipos para la digitalización de superficies reales con alta precisión (2 a 20 cm.).

### 3 Receptores de pseudo-distancia por el código. :

Construidos específicamente para aplicaciones militares, normalmente estos receptores atienden todas las especificaciones en este sentido. Para su funcionamiento exigen que se coloque un AOC ("Auxiliary Output Chip") para la decodificación del código Y, cuando el dispositivo antifraude ("Anti-Spoofing") esta activado. Su comercialización es restringida a los países autorizados por DoD ("Department of Defense") de los Estados Unidos.

### Receptores de pseudo - distancias C/A y P (Y) portadoras L1 y L2:

Son los receptores más completos y más caros disponibles comercialmente, utilizados para determinar las coordenadas de líneas de base superiores a 100 Km., pueden alcanzar hasta cerca de 1.500 Km. Son apropiados para el control de vuelos fotogramétricos y su precisión es sub-centimétrica.

Exigen software muy complejos son utilizados para la reformulación de redes planimétricas de primer orden e investigaciones del Geoidal. También se emplean para apoyar la mapificación sistemática de países. Pueden ejecutar digitalizaciones de la superficie real, sin embargo la relación costo / beneficio tiene que ser optimada para, esos casos.

A pesar de que este tipo de receptor posee un dispositivo de almacenamiento del código P en ambas frecuencias portadoras, el mismo solo es utilizado por el método de cuadratura de la señal (literalmente elevando la señal

al cuadrado) para determinar de forma muy precisa la posición, aunque en la forma post-procesada. Funcionan en pares y son excesivamente caros.

#### 2.8.4. Por el método de geoposicionamiento

1- Absoluto: Receptores del Código C/A, leves y portátiles que hacen uso del SPS, o sea, utilizan el Código C/A para la medición de la distancia satélite receptor. Poseen funciones básicas de navegación y registro de puntos por medias. Su precisión obedece las reglas del SPS.

2 - Diferenciales: Receptores absolutos con la capacidad de almacenar los datos de la posición en archivos de computadoras para correcciones diferenciales. Pueden poseer un dispositivo de conexión vía radio utilizando el protocolo RTCM SC-104, lo que permitiría precisiones de 5 a 2 metros en tiempo real. Funcionan en pares, estando un receptor fijo, estacionado en un punto de coordenadas de referencia y otro móvil, determinando posiciones o digitalizando elementos en el terreno, como perímetros, líneas abiertas o áreas cerradas.

3 Relativos o Interferométricos: Receptores que almacenan datos de las frecuencias portadoras L1 o L2 y códigos C/A y P. Pueden ser conectados vía radio, a través de una técnica llamada RTK ("Real Time Kinematic") con un protocolo análogo al RTCM SC-104. Destinados a aplicaciones geodésicas, utilizan la fase de las portadoras L1 L2 para determinar distancias. Utilizan software complejo y brindan precisiones centimétricas o subcentimétricas. Se prestan para levantamiento, cinemáticos de alta precisión, como vuelos fotogramétricos y o digitalización de superficie real.

#### 2.8.5. Otras clasificaciones

Algunas están en función de sus características en:

- Navegación. Reciben únicamente observables de código (tiempos). Son los instrumentos menos precisos, aunque su evolución está siendo espectacular. Sus aplicaciones más comunes son la navegación, catastro, GIS y levantamientos de escalas menores de 1/ 5000 en los más sofisticados.

- Monofrecuencia. Reciben las observables de código y fase de la portadora L1. La precisión de estos instrumentos ya es significativa, y son de aplicación topográfica y geodésica en pequeñas distancias (hasta 100 Km.).

- Bifrecuencia. Reciben las observables de código y fase de las portadoras L1 y L2. La precisión y el rendimiento son mucho mayores debido a la posibilidad de combinar los datos y formar en post-proceso combinaciones de observables que agilizan el cálculo y eliminan los errores de retardo atmosférico.

Están indicados para trabajos de precisión y allí donde el rendimiento y los buenos resultados requeridos sean máximos.

Finalmente es posible hacer una clasificación de acuerdo a la comunidad de usuarios:

- Receptores de uso militar - receptores de uso civil
- Receptores de navegación
- Receptores de determinación de tiempo - receptores geodésicos.

## 2.9. ESTRUCTURA DE LA SEÑAL

Cada satélite va provisto de un reloj-oscilador que provee una frecuencia fundamental de 10,23 MHz, sobre la que se estructura todo el conjunto de la señal radiodifundida por el satélite.

El satélite emite información sobre dos portadoras, la primera es el resultado de multiplicar la fundamental por 154 (1575.42 MHz) y se denomina L1.

La segunda, utiliza un factor de 120 (1227.60 MHz) y se denomina L2.

El término "L" viene determinado porque los valores usados están en la banda L de radiofrecuencias que abarca desde 1 GHz a 2 GHz (1000 a 2000 MHz). El poder utilizar las 2 frecuencias permite determinar por comparación de sus retardos diferentes, el retardo ionosférico, difícilmente predecible por otros sistemas.

Sobre estas dos portadoras se envía una información modulada compuesta por dos códigos y un mensaje, generados también a partir de la frecuencia fundamental correspondiente.

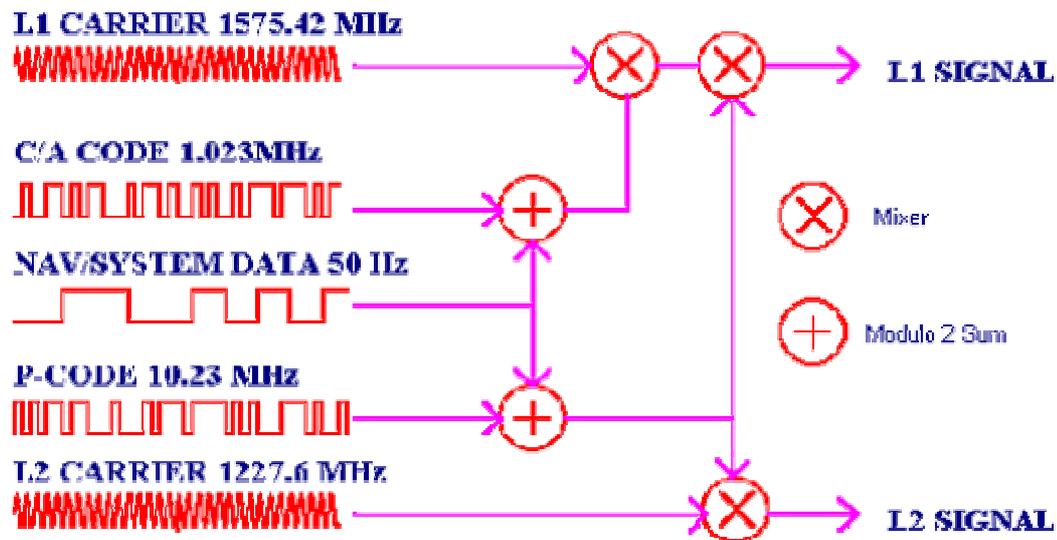


Figura 25: Estructura y tipo de las señales emitidas por los satélites GPS

El primer código denominado C/A (course /adquisition) o S (standard), Código de Acceso Libre o Civil, es una moduladora con la frecuencia fundamental dividida por 10 o sea de 1,023 MHz. Es repetido cada 0,001s aproximadamente y es único para cada satélite, o sea cada número PRN posee un código propio. El código C/A es modulado solamente en la frecuencia L1. Este código provee la base de cálculo de la pseudo-distancia para el SPS ("Standard Positioning Service") y es el más afectado por la interferencia del S/A ("Selective Availability"), error del oscilador, introducido por el DoD.

El segundo código llamado P (precise) modula directamente con la frecuencia fundamental de 10,23 MHz, posee una repetitividad de 266.4 días dividido en 38 semanas GPS y cada segmento es dedicado a un determinado satélite que pasa a repetir, a cada semana GPS, la parte del código P, a él asignado. Este código permite el posicionamiento a través del PPS ("Precise Positioning Service"), con una precisión en tiempo real superior al SPS (mejor que 10 metros). Sin embargo es de uso militar y cuando está encriptado se transforma en código "Y", solamente entidades autorizadas consiguen descodificarlo.

Y por último el mensaje ("Navigate Message Code"), se envía modulando en la baja frecuencia de 50 Hz.

Es también conocido como Código de Efemérides, navegación y Correcciones o código D.

El mensaje viene modulado sobre ambas portadoras tiene una duración de 12 m. y 30 s. debido principalmente a su longitud y su baja velocidad de transmisión. La información que contiene viene referida a:

- \* Precisión y estado del satélite (salud, en terminología GPS), ya que los satélites pueden encontrarse "sanos" o "enfermos" (inoperantes).

- \* Antigüedad de la información y de las efemérides radiodifundidas.

Almanaque y el estado de los relojes

- \* Un modelo ionosférico, para el cálculo de los retardos

Información UTC (tiempo-hora universal)

- \* Dos claves: - TLM, de telemetría, por si la órbita del satélite sufre alguna manipulación desde tierra.

HOW, que da acceso, para los usuarios autorizados, al código P.

Al conectar un receptor, el código D es el primero a ser interpretado, generando internamente en el receptor el almanaque de efemérides de los satélites, permitiendo al rastreador realizar la búsqueda de todos los satélites disponibles para la posición geográfica donde se encuentra el equipamiento.

Los códigos sirven fundamentalmente para posicionamiento absoluto y son usados principalmente en navegación. El C/A ofrece precisiones nominales decimétricas y se usa en el posicionamiento estándar SPS (Standard Positioning Service). El P ofrece precisiones nominales métricas y se usa en el posicionamiento preciso PPS (Precise Positioning Service).

El mensaje aporta toda la información necesaria para los usuarios del sistema.

Los códigos consisten en una secuencia de dígitos binarios o bits (ceros y unos). La modulación de las portadoras con éstos códigos genera un ruido electrónico que, en principio, no sigue ninguna ley y parece aleatorio, pero en realidad sus secuencias están establecidas mediante unos desarrollos polinómicos, este fenómeno se conoce con el término ruido pseudo-aleatorio (Pseudo Random Noise, PRN), y tiene la característica de que puede correlacionarse con una réplica generada por otro instrumento.

Cada uno de éstos códigos posee una configuración particular para cada uno de los satélites y constituye el denominado PRN característico, con el que se identifica a los satélites en el sistema GPS

Sobre la L1 se suelen modular los dos códigos vistos, el C/A y el P además del mensaje correspondiente. En la L2 sólo se modula el mensaje y el código P.

## 2.10. DEGRADACIÓN DE LA PRECISIÓN

Cuando en 1973 nació el proyecto que culminó en el GPS, los organismos responsables pensaban que el posicionamiento preciso (PPS) ofrecería inéditas precisiones de 10 ó 20 m en tiempo real. Fue una verdadera sorpresa, desagradable para los diseñadores, descubrir que la precisión esperada en el PPS se alcanzaba fácilmente con el posicionamiento estándar (SPS), destinado a los usuarios civiles, con receptores sencillos y baratos; el posicionamiento preciso PPS resultó ser casi un orden de magnitud mejor de lo esperado.

Pero no querían que usuarios no autorizados dispusieran de un sistema de posicionamiento con precisiones mejores de 100 m, por lo que tomaron la decisión de degradar la precisión obtenible con el SPS. Esta degradación se denominó *Selective Availability policy* o más genéricamente *SA*, traducible como *disponibilidad selectiva*.

La SA se activó por primera vez el 25 de marzo de 1990.

Cuando se activa la SA, el sistema ofrece precisiones horizontales absolutas de 100 m durante el 95 % del tiempo, y no peores de 300 m en el 99,9 % del 5 % remanente. Tengamos en cuenta que la SA se puede activar y desactivar sin previo aviso.

Al día de hoy año 2002 la S/A esta desactivada y existe un compromiso por parte del gobierno de EE.UU. de no volverla a utilizar, debido al desarrollo de mejoras tecnológicas en los satélites, que directamente dejaran de transmitir normalmente y activarán la SA al pasar por zonas conflictivas.

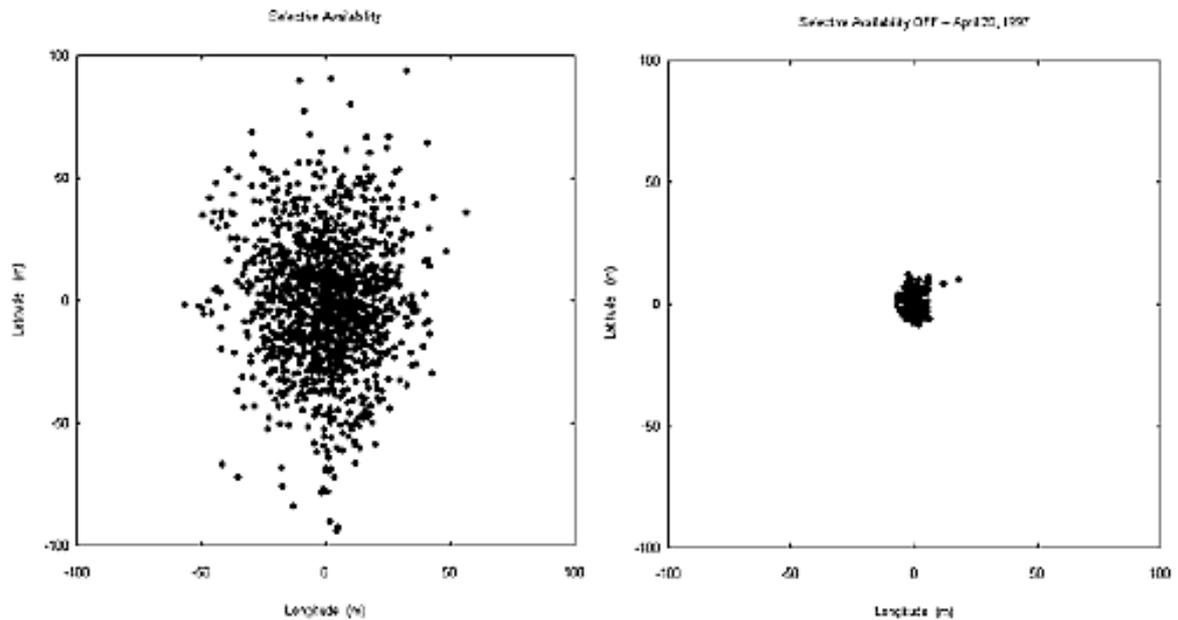


Figura 26: Desvíos en posición X, Y antes y después de desactivar la S/A

Existen básicamente dos métodos de degradación de la precisión, introducidos por las señales transmitidas por los satélites e impuestos por el DoD:

- S/A ("Selective Availability" - Disponibilidad Selectiva)
- A/S ("Anti- Spoofing" - Antifraude)

### 2.10.1. S/A - Disponibilidad Selectiva

Los satélites del Bloque II fueron equipados con dispositivos que posibilitan la variación de frecuencia del oscilador que genera el Código C/A.

Existen dos formas de hacer efectivo la S/A:

1) la primera es la variación directa de la frecuencia generadora del Código C/A por el oscilador de a bordo, lo cual, causa una imprecisión en la medida de la pseudo-distancia, entre la antena del receptor y el satélite, y se refleja en la precisión de la coordenada calculada por el receptor. Esta variación de frecuencia causada por el oscilador, es pseudo-aleatoria, de tal manera que, el cómputo de medias disminuye, pero no elimina el error.

2) la segunda es la introducción en el "buffer" del satélite, de efemérides erradas. De esta forma, el satélite informa vía Código D, su posición con un error, lo cual se refleja en la imprecisión de la coordenada calculada por el receptor.

Estos errores de la localización exacta del satélite también son pseudo-aleatorios, evitando que el cálculo de la posición por medias disminuya la imprecisión sin eliminarlos totalmente.

### 2.10.2. A/S – Antifraude

Es el encriptamiento del código de distancia precisa P, generando en sustitución el Código Y (comúnmente se designa el Código P por P (Y)).

De esta manera los receptores del Código P, dejan de reconocer el referido, código como una señal transmitida por el GPS. En esta situación el transmisor interrumpe el cálculo de la posición o pasa a ofrecerla con resultados absurdos.

El A/S, estando activos los receptores del código P, solamente podrá continuar funcionando correctamente si es dotado de un AOC ("Auxiliary Output Chip"), el cual alimentado con la clave de descryptografía, consigue interpretar el Código Y.

Solamente personas autorizadas por el DoD poseen los AOC, así Como las claves periódicas de descryptografía.

Es obvio que los usuarios autorizados (fundamentalmente fuerzas militares estadounidenses y amigas) disponen del adecuado contra proceso (*decrypting key*) para recuperar la precisión original, eludiendo así la SA en posicionamiento absoluto, estándar o preciso.

Para el resto de los usuarios la precisión obtenible en el posicionamiento absoluto usando el código CIA, o sea, el posicionamiento estándar SPS, pasa de los entre 20 a 40 m obtenibles en condiciones normales, a 100 m o más con la SA activada.

El posicionamiento relativo o diferencial, por su propio fundamento, no se ve seriamente afectado. Una precisión absoluta de 25 m en una figura geodésica trilaterada con lados de más de 20 000 Km. (distancias a los satélites) representa aproximadamente 1 ppm.

## 2.11. SISTEMAS DE MEDIDA

El GPS es un sistema que permite hacer posicionamientos por medición o variación de distancias, entre las antenas emisoras de los satélites y la receptora

del equipo. Existen dos posibilidades principales de funcionamiento, mediante Pseudodistancias o por medidas de fase.

### 2.11.1. Pseudodistancia

El método de Pseudodistancias es propio de la técnica GPS. Se trata de una auténtica trilateración tridimensional, que sitúa a la estación de observación, en la intersección de las esferas con centro en el satélite y radio correspondiente a la distancia entre las antenas de los satélites y el receptor, medida por este.

La pseudodistancia se podría definir como el desplazamiento temporal necesario para correlar una réplica del código GPS, generado en el receptor, con la señal procedente del satélite y multiplicado por la velocidad de la luz.

El satélite emite uno de los códigos, el receptor tiene en su memoria la estructura de dicho código y genera una réplica exacta, modulando la señal recibida con la réplica inversa del código.

NAVSTAR GPS es un sistema de medición de distancias de vía única, lo cual significa que las señales son transmitidas solamente por satélite. La observación fundamental, es el tiempo de propagación de señal entre la antena del satélite y la antena receptora.

Se denomina distancimetría de vía única a la comparación entre la lectura del reloj de la antena transmisora y la lectura del reloj de la antena del receptor.

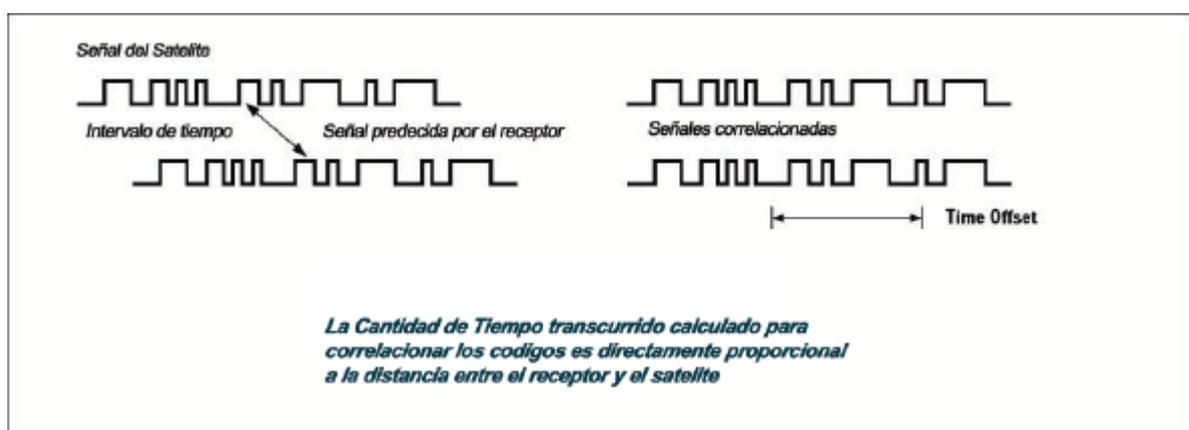


Figura 27: Señales GPS

Si ambos códigos están precisamente sincronizados, el código desaparecerá dejando a la portadora limpia. Para sincronizar la réplica con el original recibido, el instrumento empieza a aplicar un retardo hasta que la anulación se produce. El tiempo del retardo nos permite calcular una distancia que no será precisamente la existente, ya que no conocemos el estado del reloj del receptor.

Por lo general no se puede asumir que los dos relojes se hallen exactamente sincronizados. El tiempo de propagación de señal observado incluye por lo tanto un error sistemático de sincronización (Bias de tiempo). Distancias con este error sistemático (bias) se llaman también pseudo distancias (*pseudoranges*). Por lo consiguiente, se puede considerar como principio fundamental de observación del sistema GPS, la determinación de pseudo distancias.

La precisión de posicionamiento que nos ofrece este método es de aproximadamente un 1% del periodo entre sucesivas épocas de un código. Así para el código P, cuyas épocas son de 0,1 microsegundo (por lo que la precisión de medida será de 1 nanosegundo), al multiplicar dicho factor por la velocidad de la luz, obtendremos una precisión de distancia de 30 cm. en tiempo real. Para el código C/A, cuya precisión es diez veces menor a la del código P, obtendremos unos errores de unos 3 m.

### **2.11.2. Medidas de fase.**

El método de medidas de fase es el que permite obtener mayor precisión. Su fundamento es el siguiente: partiendo de una frecuencia de referencia obtenida del oscilador que controla el receptor, se compara con la portadora demodulada que se ha conseguido tras la correlación, controlándose así, en fase, la emisión radioeléctrica realizada desde el satélite con frecuencia y posición conocidas. Cuando esta emisión llega a la antena, su recorrido corresponde a un número entero de longitudes de onda (denominado N o ambigüedad) mas una cierta parte de longitud de onda cuyo observable (o momento exacto de recepción por parte de la antena) puede variar entre 0 y 360°. Tenemos pues, una frecuencia y cierta parte de la longitud de onda conocidas, y la ambigüedad (Número entero de las longitudes de onda) por conocer. La resolución de la ambigüedad se realiza en base a un extenso proceso de cálculo, que además nos

resolverá el estado de los relojes y por supuesto los incrementos de coordenadas entre estaciones. Una vez obtenidos dichos valores, la resolución interna que nos proporcione el sistema, será de orden submilimétrico, aunque diversas fuentes de error limiten la precisión operativa a centímetros, siempre en función de las técnicas de observación empleadas.

Debe destacarse que es fundamental en el sistema no perder el seguimiento de la fase para que la ambigüedad inicial no pueda variar. Si hay alguna pérdida de recepción por cualquier causa, la cuenta de ciclos se rompe (Cycle Slip), perdiendo este método toda su eficacia. Esta pérdida de ciclos puede ocurrir por muchas causas desde el paso de un avión, disturbios ionosféricos, u obstrucciones físicas importantes (edificios, etc.). Podremos comprender, entonces, la dificultad de trabajar en zonas próximas a arbolados, tendidos eléctricos, torres, edificios, etc., limitando las aplicaciones de éste método en tiempo real.

## **2.12. MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO**

### **2.13. MÉTODO ABSOLUTO**

Como fue señalado, el método de posicionamiento absoluto se obtiene a partir de los códigos de pseudo-distancia ("Ranging Codes") C/A y P. Estos códigos binarios son transmitidos por los satélites y también generados en el receptor, para posteriormente ser comparados.

Como estos códigos son transmitidos por ondas electromagnéticas y estas viajan aproximadamente a la velocidad de la luz ( $c$ ), entonces es posible medir la distancia (instantánea) entre el satélite y la antena del rastreador a partir de la simple ecuación de movimiento: de esta manera, se puede medir fácilmente la distancia entre los satélites rastreados y la antena del receptor, además se presupone que exista sincronismo entre el reloj del satélite y el reloj del receptor.

### **2.14. MÉTODO DIFERENCIAL**

El método de Posicionamiento Diferencial, es aquel en que las posiciones absolutas obtenidas por un receptor móvil, son corregidas por un otro receptor fijo, estacionado en un punto de coordenadas de referencia. En este proceso, son

eliminados casi totalmente los errores. Así las posiciones corregidas con un DOP menor que 5 se sitúan en el rango de precisión de 5 a 0,5 metros.

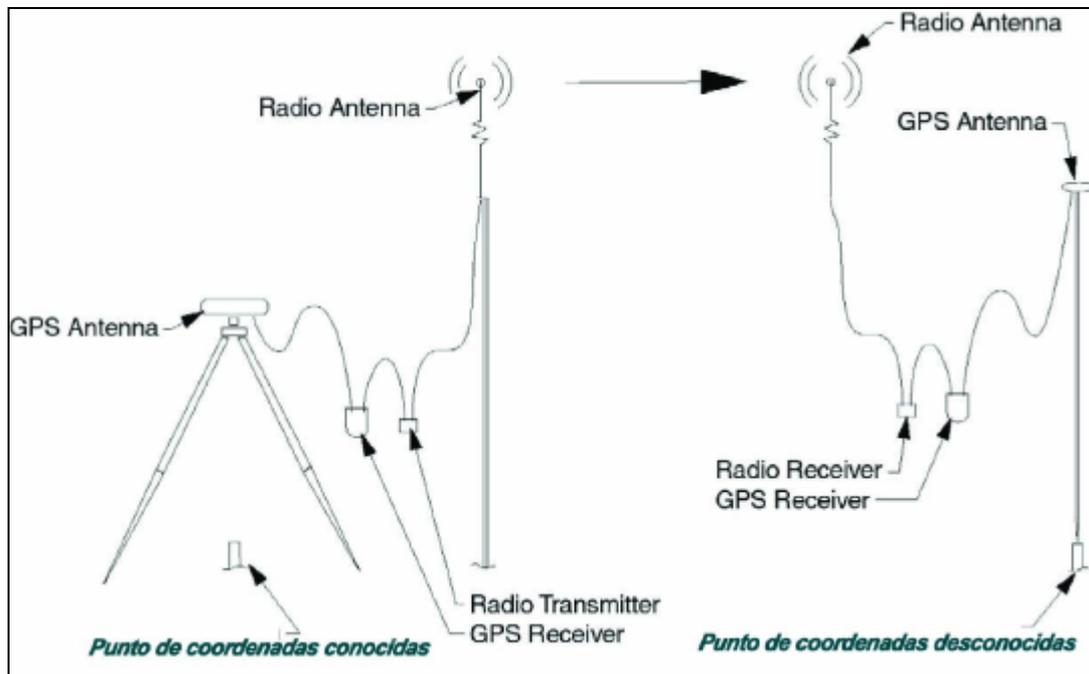


Figura 28: Esquema de un sistema DGPS

Nótese que los dos receptores (referencia y móvil) deben rastrear los mismos satélites, al mismo tiempo.

El método diferencial de posicionamiento GPS, posee las siguientes variantes

#### 2.14.1. DGPS en tiempo real

En esta variante las correcciones diferenciales son transmitidas al receptor remoto por un enlace radial de datos, utilizando, el protocolo RTCM-SC-104 ("Radio Technical Commission for Maritime Services Special Conunittee No. 104") que especifica el modo de transmisión de datos GPS (por "link" de radio) para estas correcciones.

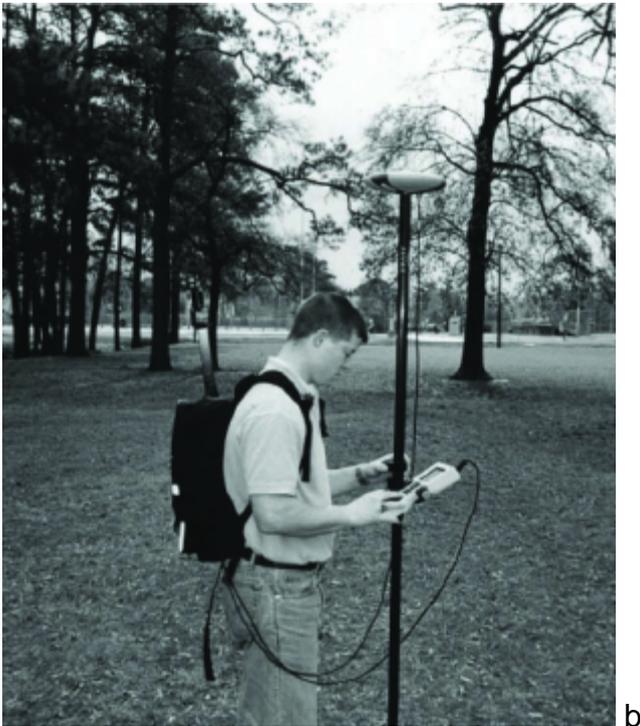
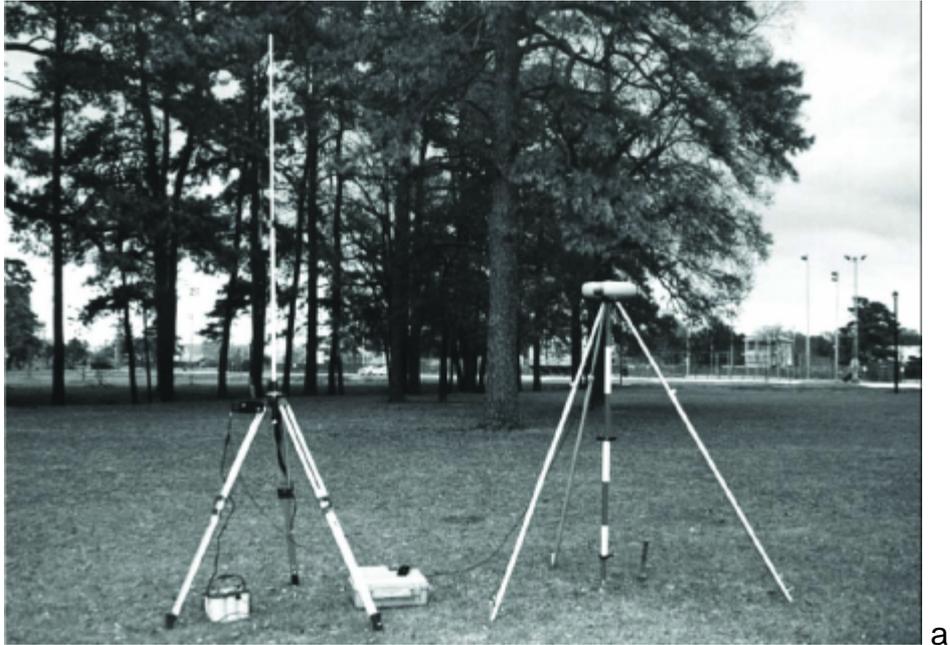


Figura 29: Fotografías de un sistema DGPS, a Estación Base, b Receptor móvil (también llamado Rover).

El receptor "rover", podrá entonces grabar sus datos en archivos en el propio receptor, para su posterior descarga en CADs o GIS.

Este Proceso ofrece precisiones de 1 a 10 metros, en dependencia del DOP.

### 2.14.2. DGPS Post-procesado

En esta variante no existe enlace de radio entre los receptores fijo y móvil. La corrección diferencial se hace posteriormente con los datos descargados de los receptores y procesados por un software propio. La gran ventaja de este proceso en relación al anterior es que el usuario tiene un control total sobre los puntos que están sufriendo corrección diferencial, a través de filtros como el número DOP del "rover", desviación típica de las pseudo - distancias medidas por el receptor remoto, intensidad de la señal de determinado satélite (evitando ruidos). El usuario puede además eliminar uno u otro punto, o un grupo de elementos Registrados, por no satisfacer la precisión del proyecto en que se esta trabajando. La otra gran ventaja es con respecto a los costos. El DGPS postprocesado no necesita del "link" de radio, ya cual es una gran ventaja cuando las distancias son muy grandes, ya que el costo de un Transmisor - receptor es mayor que el costo del propio receptor GPS.

### 2.14.3. DGPS de Campo

Esta tercera variante del DGPS es una alternativa para quien posee solo receptores absolutos. La precisión oscila entre los 15 y 10 metros y es ejecutado de la siguiente manera:

- Se estaciona un receptor absoluto en un punto de coordenadas conocidas.
- Se combinan las horas minutos y segundos (las correcciones diferenciales varían a cada 15 segundos) en los cuales se grabarán los puntos, tanto en el receptor fijo, cuanto en el móvil (debe ser el mismo horario para ambos).
- Después de la operación de campo, para cada punto grabado en la base se calculan las diferencias simples  $A_p$ ,  $A_k$  y  $A_H$ , para cada horario combinado.
- Se verifica si los satélites recibidos por el receptor base fueron los mismos para el receptor "rover" en cada horario que los puntos fueron grabados (esta información es coman entre todos los receptores, en la grabación de coordenadas de puntos grabados y nominados).

- Se eliminan entonces los puntos que no satisfacen la condición anterior.
- Para el resto de los puntos se aplican entonces las diferencias calculadas para cada punto/horario.

## 2.15. MÉTODO RELATIVO INTERFEROMÉTRICO

Hasta el momento se describió el posicionamiento GPS utilizando los códigos de pseudo-distancia C/A y P como elementos para el cálculo de las distancias receptor - satélite capaz de resolver las ecuaciones de trilateración espacial.

El Método Relativo Interferométrico es por amplio margen el mas preciso de todas las técnicas de geoposicionamiento GPS. Se basa en la medida de las distancias receptor satélite, no por la comparación de los "ranging-codes", sino por el cúmulo de las distancias a través de la propia onda portadora mediante procesos interferométricos.

Los cálculos interferométricos se basan en las diferencias de fase de portadoras L1 y L2, dejando el satélite y llegando a la antena del receptor.

Modelando estas diferencias de fase se calcula el número entero de longitudes de onda entre el receptor y el satélite, conocido como "ambigüedad entera". Calculando las ambigüedades para cada satélite, basta multiplicar estos enteros por la longitud de onda  $\lambda$ , de cada portadora, sumándose a continuación las diferencias de fase, para obtener entonces no las pseudo-distancias, sino la verdadera distancia entre el receptor y el satélite, para cada instante.

## 2.16. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Aunque pueda parecer improbable, la idea general detrás del GPS es utilizar los satélites en el espacio como puntos de referencia para posicionarnos aquí en la tierra.

Esto se logra mediante una muy exacta, medición de nuestra distancia hacia al menos tres satélites, lo que nos permite "triangular" nuestra posición en cualquier parte de la tierra.

Como veremos mas adelante, en realidad se producen los cálculos por “trilateración” y no por triangulación, puesto que se miden “**distancias**” y no “**ángulos**”),

Olvidémonos por un instante sobre cómo mide nuestro GPS dicha distancia. Consideremos primero, como, la medición de esas distancias nos permiten ubicarnos en cualquier punto de la tierra, para ello:

Supongamos que medimos nuestra distancia al primer satélite y resulta ser de 20.000 Km.

Sabiendo que estamos a 20.000 Km. de un satélite determinado, no podemos por lo tanto estar en cualquier punto del universo sino que esto limita nuestra posición a la superficie de una esfera que tiene como centro dicho satélite y cuyo radio es de 20.000 Km.

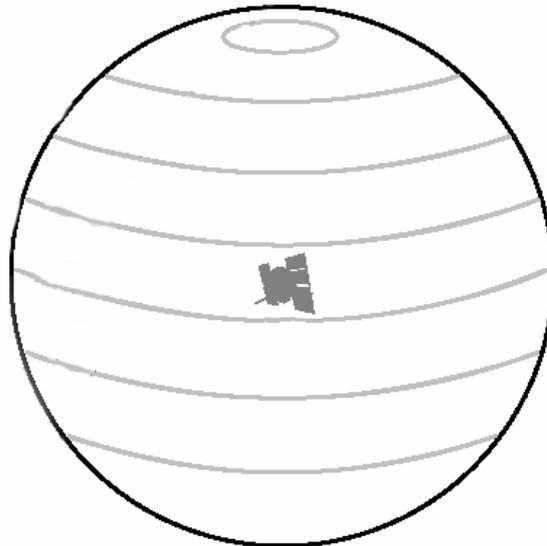


Figura 30: Localización con una pseudodistancia.

A continuación medimos nuestra distancia a un segundo satélite y descubrimos que estamos a 23.000 Km. del mismo, esto nos dice que no estamos solamente en la primer esfera, correspondiente al primer satélite, sino también sobre otra esfera que se encuentra a 23.000 Km. del segundo satélite. En otras palabras, estamos en algún lugar de la circunferencia que resulta de la intersección de las dos esferas.

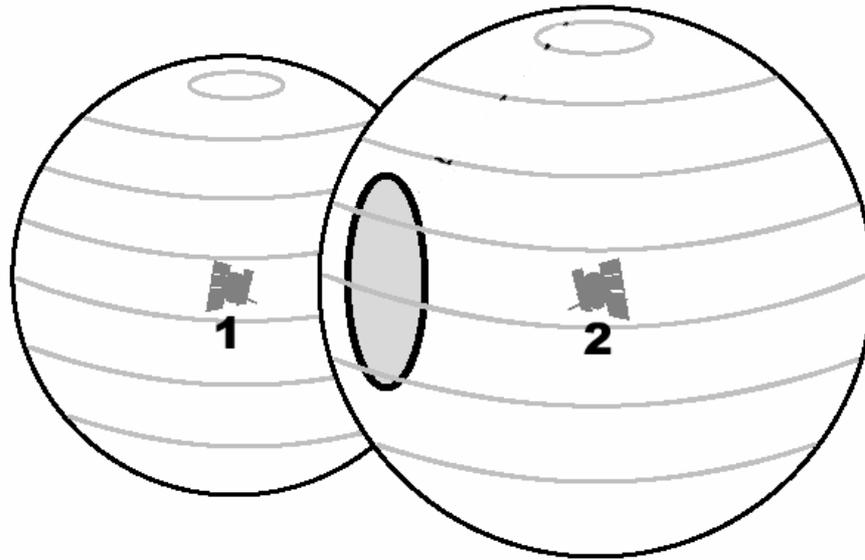


Figura 31: Localización con dos pseudodistancias

Si ahora medimos nuestra distancia a un tercer satélite y descubrimos que estamos a 25.000 Km. del mismo, esto limita nuestra posición aún más, a los dos puntos en los cuales la esfera de 25.000 Km. corta la circunferencia que resulta de la intersección de las dos primeras esferas.

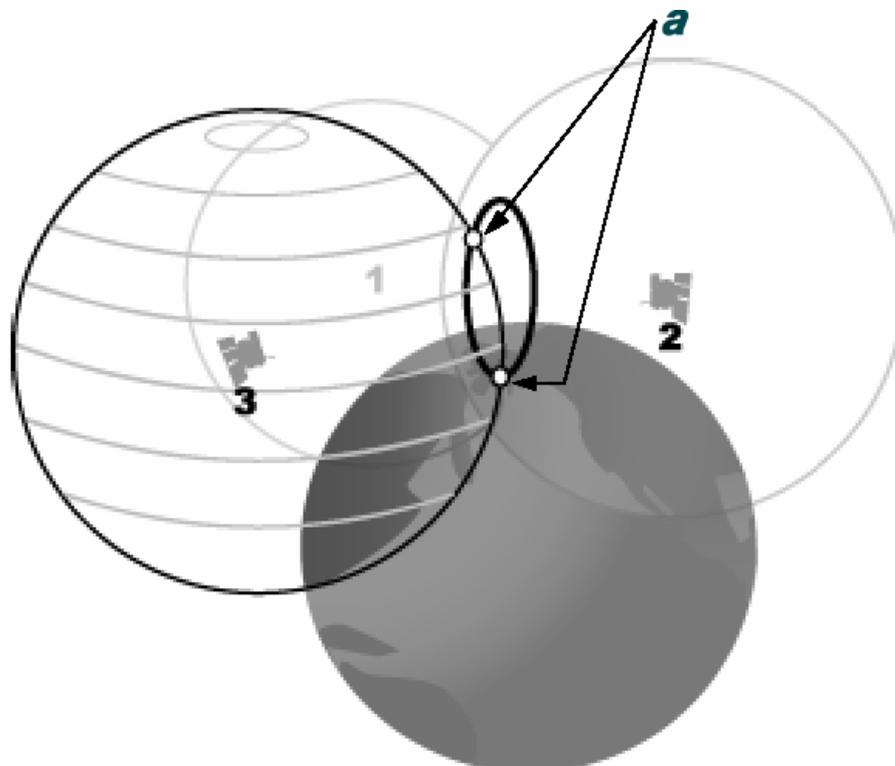


Figura 32: Localización con tres pseudodistancias

O sea, que midiendo nuestra distancia a tres satélites limitamos nuestro posicionamiento a solo dos puntos posibles. (Puntos "a" de la figura 32).

Para decidir cual de ellos es nuestra posición verdadera, podríamos efectuar una nueva medición a un cuarto satélite. Pero normalmente uno de los dos puntos posibles resulta ser muy improbable por su ubicación demasiado lejana de la superficie terrestre y puede ser descartado sin necesidad de mediciones posteriores.

El problema es que el método para estimar la distancia hasta un satélite depende en extremo de la calidad de los relojes empleados para medir el tiempo. Los factores que afectan a la medida de la distancia son:

El **desfase en el reloj del receptor** (que suele ser de calidad media) puede provocar un apreciable error de distancia.

Los **errores en el reloj del satélite** suelen ser despreciables, pero también hay que considerarlos.

La **propagación a través de la atmósfera** produce un retardo variable debido a que la refracción que provoca varía de forma poco predecible.

Por estas razones lo que un receptor mide a partir de las señales recibidas son **pseudodistancias**, en las que se incluye un error provocado por las derivas de reloj del usuario, los retardos variables de la ionosfera, etc.

Para el receptor hay 4 incógnitas a resolver: las tres coordenadas de su posición, y la diferencia entre su reloj local y el tiempo universal GPS.

## CAPÍTULO III

### ERRORES EN LAS OBSERVACIONES

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

Una vez en proceso de toma de datos y con posterioridad a la visualización de la información que nos muestra el receptor, también hemos de controlar una serie de parámetros que van a condicionar de gran manera las precisiones que podamos obtener:

Al igual que cualquier observación de topografía clásica, una observación GPS está sometida a varias fuentes de error que se pueden minimizar o modelar según los equipos y metodología de observación que utilicemos. Un receptor determina las distancias que hay entre su antena y las antenas de los satélites desde los cuales está recibiendo su señal. Basándose en estas distancias y en el conocimiento de las posiciones de los satélites, el receptor puede calcular su posición. Sin embargo, diversos errores afectan a la medida de la distancia y por consiguiente se propagan al cálculo de la posición del receptor.

Las medidas de código y las medidas de fase se ven afectadas por errores sistemáticos y por ruido aleatorio. La precisión en posicionamiento absoluto que un usuario puede alcanzar con un receptor depende principalmente de cómo sus sistemas de hardware y software puedan tener en cuenta los diversos errores que afectan a la medición. Estos errores pueden ser clasificados en tres grupos: los errores relativos al satélite, los errores relativos a la propagación de la señal en el medio, y los errores relativos al receptor.

Tabla 1: Clasificación de los errores en el posicionamiento con satélites.

ELEMENTO	FUENTE DE ERROR
Satélite	Errores en el oscilador
	Errores o variaciones en los parámetros orbitales

Propagación de la señal	Refracción ionosférica
	Refracción troposférica
	S/A. Disponibilidad Selectiva
	Pérdidas de ciclos
	Multipath. Ondas reflejadas
Receptor	Errores en el oscilador
	Error en las coordenadas del punto de referencia
	Error en el estacionamiento
	Error en la manipulación del equipo
	Variación y desfase del centro de la antena

Algunos de estos errores sistemáticos pueden ser modelados e incluso eliminados utilizando combinaciones apropiadas de los observables a partir de una o dos frecuencias, o trabajando en modo diferencial, utilizando dos receptores.

En la medida de la calidad y bondad de una observación van a influir o contribuir dos términos: el URE y el DOP. El URE (User Range Error) es el error cometido en la medida de la pseudo distancia por el usuario. Este error contempla los errores al predecir las efemérides, inestabilidades en el vehículo espacial, relojes de los satélites, efectos ionosféricos y troposféricos, efecto multipath, ruido de la señal y para GPS, la Disponibilidad Selectiva (SA). Todos estos errores en su conjunto se recogen en el valor  $\sigma_{URE}$ . El DOP o Dilución de la Precisión es la contribución puramente geométrica al error en el posicionamiento de un punto. Es un valor adimensional que da una idea de la solidez de la figura formada por el receptor y los satélites que tiene a la vista. Analizando estos factores de error en su conjunto, el error en el posicionamiento de un punto viene expresado por:

$$\text{Error rms de posición} = \sigma_{\text{URE}} \cdot \text{DOP}$$

## 3.2. ERRORES RELATIVOS AL SATÉLITE

### 3.2.1. Error del reloj del satélite

La sincronización de los relojes y la de las frecuencias del sistema GPS se realizan desde el Segmento Terrestre del sistema. Todas las frecuencias de los satélites están sincronizadas con los relojes de los satélites, y la mayor desviación diaria permitida de la frecuencia de reloj es de  $10^{-12}$  MHz (o lo que es lo mismo: una millonésima de Hz.). Dada la extrema exactitud precisada, como citamos anteriormente, hay que considerar los efectos relativistas provocados por la gran velocidad de los satélites y por la diferente gravedad existente a 20169 Km. de la Tierra.

Este error es el desfase que tiene el reloj del satélite respecto al Tiempo. Los satélites llevan relojes atómicos con osciladores de cesio y de rubidio, sin embargo ningún reloj, incluso el atómico es perfecto.

Los errores en los osciladores de los satélites pueden eliminarse mediante las correcciones enviadas en el mensaje de navegación que recibe el receptor, y que son calculadas y actualizadas por las estaciones de seguimiento.

Para cada reloj de satélite se determina su desfase para una época inicial, y los coeficientes de la marcha o deriva del estado del reloj. Estos parámetros se graban en el correspondiente satélite y se incluyen en el mensaje de navegación que manda el satélite. Pero aunque el receptor aplique las correcciones para el error del reloj del satélite, sigue permaneciendo un pequeño error residual estimado en unos 10 nanosegundos o menos, y que es debido a la imposibilidad de predecir exactamente la marcha del estado del reloj del satélite.

### 3.2.2. Errores en los parámetros orbitales

Para calcular su posición, el receptor debe conocer las posiciones de los satélites. Las estaciones de seguimiento registran datos de pseudo distancia y medidas de fase que mandan a la Estación de Control principal, donde con un sofisticado software se predicen las futuras posiciones orbitales de los satélites,

es decir sus efemérides. Éstas son transmitidas en el mensaje de navegación del satélite. Pero las efemérides transmitidas por los satélites tendrán asociado un error a causa de que es imposible predecir exactamente sus posiciones. El efecto del error de las efemérides transmitidas en la medida de la pseudo distancia se obtiene proyectando el vector error de la posición del satélite sobre el vector que une el satélite y el receptor. Los errores en los parámetros orbitales se pueden eliminar trabajando con las efemérides precisas de los días de observación, donde aparecen las verdaderas posiciones de los satélites.

Para líneas base cortas, trabajando en modo diferencial con dos receptores, respecto a los mismos satélites de observación, podemos eliminar todos los errores relativos a los satélites, ya que afectan de igual forma a ambos receptores. Para líneas base largas, el error del reloj del satélite se elimina igual, ya que es independiente de la línea base e igual en ambos puntos, pero los errores en los parámetros orbitales no se eliminan del todo, porque los errores que provocan en la pseudo distancia a un satélite en un punto no son los mismos que los que se producen en el otro punto para el mismo satélite e instante.

### **3.3. ERRORES RELATIVOS A LA PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL**

Debemos comentar un aspecto común a todos los sistemas que empleen emisiones radioeléctricas.

Una onda electromagnética que provenga del espacio debe atravesar tres zonas características antes de alcanzar un receptor estacionado sobre la superficie terrestre: el vacío, la ionosfera y la troposfera.

El retardo se define aquí como el incremento que sufre el tiempo de propagación de una señal electromagnética entre dos puntos al efectuarse el tránsito por un medio que no sea el vacío, en vez de hacerlo por el vacío.

Se debe a dos factores: la velocidad de propagación es menor y la trayectoria (si el medio no es isótropo) aumenta su longitud al curvarse por refracción y ser envolvente de la recta que une los puntos origen y destino de la señal.

También hay que considerar los efectos relativistas sufridos por la señal al propagarse entre dos puntos con diferentes gravedades y velocidades relativas.

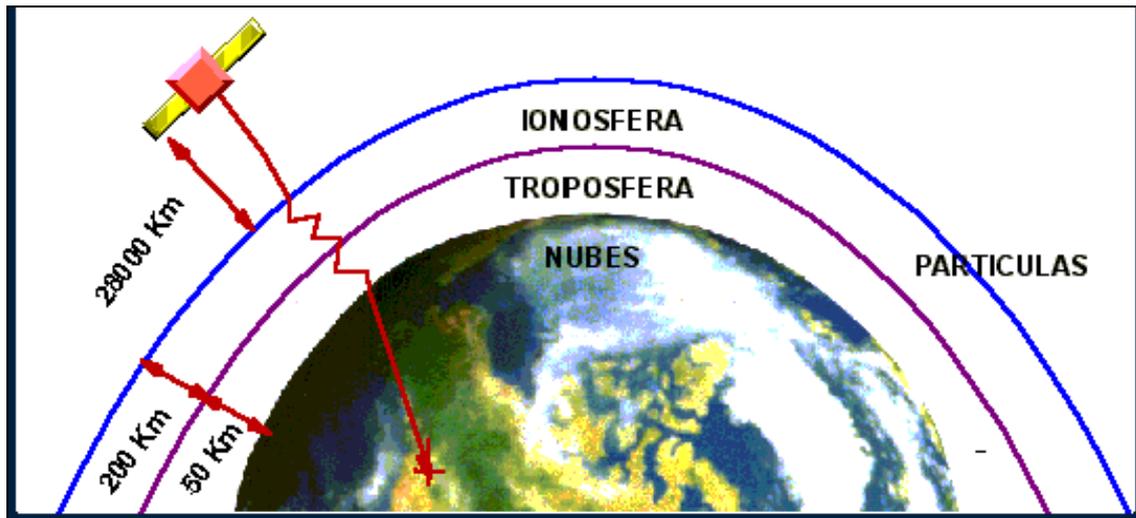


Figura 33: Representación esquemática de la influencia atmosférica en las señales provenientes de los satélites GPS.

La velocidad de propagación de la señal es crítica para cualquier sistema de medida de distancias. Esta velocidad multiplicada por el intervalo de tiempo en que se propagó la señal nos da una medida de la distancia. Si una onda electromagnética se propaga por el vacío, su velocidad de propagación, sea cual sea su frecuencia es la velocidad de la luz ( $c$ ). Sin embargo, en el caso de observaciones GPS o GLONASS, las señales deben atravesar las capas de la atmósfera hasta llegar al receptor posicionado sobre la superficie de la tierra. Las señales interactúan con partículas cargadas, que provocan un cambio en la velocidad y dirección de propagación, es decir, las señales son refractadas.

### 3.3.1. Refracción ionosférica.

Una de las principales causas de error es la refracción provocada por la ionosfera y la troposfera. Las diferencias de tiempo son variables y poco previsibles, y pueden ser tan costosas en distancia como 100 metros (con un valor  $s$  de 20-30 metros de día y 3-6 metros de noche), pero si se utilizan dos frecuencias distintas se puede estimar el efecto real

La Ionosfera es aquella región de la atmósfera comprendida entre 100 y 1000 Km. de altitud, donde las radiaciones solares y otras radiaciones ionizan una porción de las moléculas gaseosas liberando electrones, que interfieren en la propagación de ondas de radio.

La Ionosfera es un medio disperso para ondas de radio, por lo tanto su índice de refracción es función de la frecuencia de la onda. También es función de la densidad de electrones, y en menor grado, de la intensidad del campo magnético de la tierra.

Este error es negativo para la medida de fase (se produce un avance de la portadora y se miden distancias más pequeñas), y positivo para las pseudo distancias (se produce un retardo y se miden distancias más largas), pero tienen el mismo valor absoluto.

El error es proporcional a la densidad de electrones (TEC-Total Electron Content) a lo largo del camino seguido por la señal, y está en función del cuadrado de la longitud de la onda (inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la portadora). Este error varía espacial y temporalmente, es decir, para cada punto según su latitud y longitud, y momento de la observación. Se pueden utilizar modelos ionosféricos, que establecen la distribución del TEC, pero estas concentraciones de electrones son irregulares y poco predecibles, por lo que cualquier modelo ionosférico es sólo una aproximación. El TEC es función del cambio constante en la ionización solar, de la actividad magnética, de los ciclos de las manchas solares, hora del día, lugar de observación, y dirección del camino de la señal.

Debido a la dificultad de encontrar un modelo satisfactorio, se emplea un método más eficiente para eliminar la refracción ionosférica que es la utilización de dos señales con diferentes frecuencias. Como el retardo depende de la longitud de la onda, será distinto para cada frecuencia y podremos observar un retardo diferencial entre ambas, que será mayor cuanto mayor sea el retardo ionosférico sufrido, siendo por tanto este deducible.

También se pueden utilizar combinaciones de las observables que por su naturaleza estén libres del efecto ionosférico. Tal es el caso de la combinación de fases llamada "*combinación libre de efecto ionosférico*", lo que se pretende es obtener coeficientes para que los valores del efecto ionosférico que sufren ambas portadoras sea eliminado.

La eliminación de la refracción ionosférica es la mayor *ventaja* de la combinación lineal libre de efecto ionosférico, pero el término libre de efecto ionosférico no es del todo correcto, ya que para su obtención hay que considerar algunas aproximaciones.

Si sólo se registran medidas en una sola frecuencia, tanto en pseudo distancias como en medida de fase, entonces se tiene que emplear un procedimiento alternativo para eliminar el efecto ionosférico. Normalmente se usan modelos empíricos para corregir el efecto, en los que se modela el TEC en función del tiempo, lugar de observación y dirección de la señal. En el mensaje de navegación se incluyen unos parámetros para tal modelo. Usando este modelo se pueden llegar a reducir en un 50% los efectos de la Ionosfera.

El retardo ionosférico depende del ángulo de elevación del satélite, siendo menor en el cenit, y mayor cuando disminuye el ángulo de elevación. En observaciones nocturnas, los niveles de TEC son menores que durante el día, lo que implica un menor error en la pseudo distancia.

Pero después de la aplicación del modelo empírico transmitido puede quedar algún error ionosférico residual que afectará principalmente a la componente altimétrica del punto y a la estimación del error del reloj del receptor.

Este error contribuye poco a la posición planimétrica cuando la concentración de electrones encima del receptor es uniforme.

### **3.3.2. Refracción troposférica**

La Troposfera es la última zona o capa de la atmósfera (hasta unos 80 Km., pero sólo en los últimos 40 se producen retardos significativos), donde se produce retardo y donde las temperaturas decrecen con el incremento de altura.

El espesor de la Troposfera no es el mismo en todas las zonas. La presencia de átomos y moléculas neutros en la Troposfera afecta a las señales de propagación electromagnética.

La desventaja está en que no es posible eliminar la refracción troposférica con medidas en las dos frecuencias.

Se puede mejorar el cálculo del retardo troposférico tomando datos meteorológicos en el lugar de observación.

El gradiente térmico admite modelación con precisión aceptable, pero el principal problema está en la forma de modelar el vapor de agua, que tiene una irregular distribución. El simple uso de medidas meteorológicas en superficie no puede dar la precisión alcanzable con los radiómetros de vapor de agua. Estos instrumentos miden la radiación basal que se recibe desde el espacio en la

dirección de la observación, y son capaces de medir el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

El efecto del *retardo ionosférico* y el *troposférico* debido al vapor de agua sobre las emisiones de la banda radioelétrica es menor cuanto mayor sea la frecuencia, o cuanto menor sea la longitud de la onda. La refracción ionosférica y troposférica puede ser eliminada trabajando en modo diferencial, pero esto es sólo cierto para líneas base pequeñas, donde las medidas de distancias satélite-receptor se ven afectadas de igual forma por la refracción. De otro modo, ya vimos que la refracción ionosférica puede ser eliminada utilizando una adecuada combinación de datos en doble frecuencia.

### 3.3.3. Disponibilidad selectiva

Existen dos formas de hacer efectivo la S/A:

- 1) La primera es la variación directa de la frecuencia generadora del Código C/A
- 2) La segunda es la introducción en el "buffer" del satélite, de efemérides erradas.

La Disponibilidad Selectiva supone una alteración o manipulación de la información que los satélites de la constelación GPS envían a los usuarios en su mensaje de navegación, manipulación que realiza el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD). Se actúa sobre los estados de los relojes y parámetros orbitales. Trabajando con posicionamiento relativo o diferencial se puede eliminar este error.

### 3.3.4. Pérdidas de ciclos

Las pérdidas de ciclos (cycle slips), suponen un salto en el registro de las medidas de fase, producido por alguna interrupción o pérdida de la señal enviada por el satélite. Estas pérdidas de ciclos pueden ser causadas por la obstrucción de la señal del satélite debido a la presencia de árboles, edificios, puentes, montañas, etc. Esta causa es la más frecuente, pero también pueden ser debidas a una baja calidad señal-ruido, debido a unas malas condiciones ionosféricas, efecto multipath, receptores en movimiento, o baja elevación del satélite. Otra causa puede ser un fallo en el software del receptor, que conduce a un procesamiento incorrecto de la señal. Una última causa de pérdida de ciclo,

aunque suele darse en raras ocasiones, es aquella debida a un mal funcionamiento del oscilador del satélite.

Una vez determinado el tamaño de la pérdida de ciclo, el software interno del receptor es capaz (in situ) de detectar y corregir las pérdidas de ciclo.

### 3.3.5. Efecto multipath

El efecto multipath o multicamino es causado principalmente por múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite en superficies cercanas al receptor.

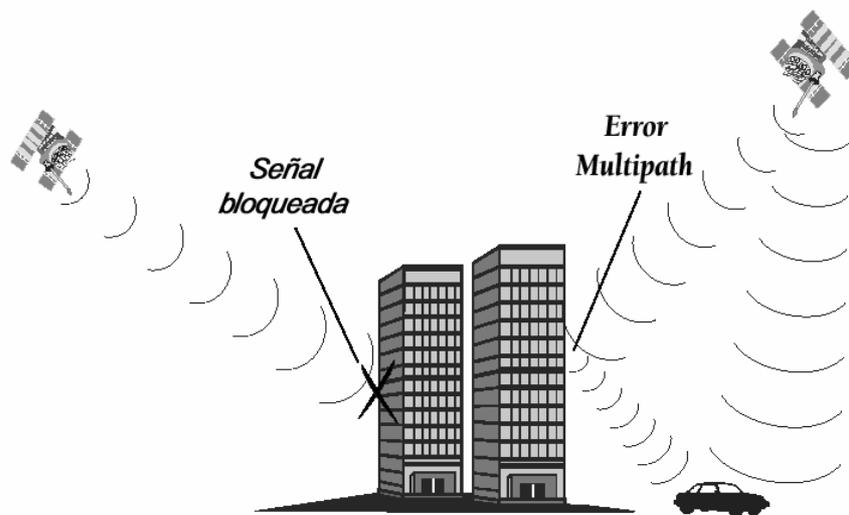


Figura 34: Esquema del efecto Multipath y del bloqueo de señales.

Estas señales reflejadas que se superponen a la señal directa son siempre más largas, ya que tienen un tiempo de propagación más largo y pueden distorsionar significativamente la amplitud y forma de la onda. Este efecto puede ser considerablemente reducido eligiendo puntos de estación protegidos de reflexiones (edificios, vehículos, árboles, etc.), es decir, evitar las superficies reflectantes en las proximidades del receptor; y por un apropiado diseño de la antena, como es la utilización de planos de tierra, que reducen las interferencias de señales con baja elevación o incluso con elevación negativa, que son las que provocan el multipath, en otras palabras, se intenta reducir la intensidad de las señales secundarias y aislar a la señal directa. El efecto multipath depende de la frecuencia de la portadora. Por lo tanto, las medidas de fase se verán menos afectadas que las medidas de código, donde el efecto multipath puede alcanzar hasta el nivel de metro.

La propagación multipath afecta tanto las mediciones de código como las de diferencia de fase. Se han registrado en observaciones con código P con variaciones de 1 a 3 m en un ambiente favorable y de 4 a 5 m en un ambiente con muchas reflexiones. Bajo las peores condiciones de recepción el multipath de la señal del código puede causar que se pierda el bloqueo de fase en el receptor. Muchos cycle slips son producto de efectos multipath.

El multipath de la señal del código se torna particularmente crítico cuando se usa la técnica de combinación de código y portadora para la resolución de ambigüedades. Los efectos multipath tienen que ser tomados en cuenta con el creciente uso de receptores de código P en levantamientos precisos y rápidos.

A causa de la geometría de los satélites que va cambiando, el efecto multipath también va variando.

El efecto multipath en los resultados de posición puede ser minimizado con observaciones de un periodo de tiempo más extenso. Esto no es posible en mediciones cinemáticas o estáticas rápidas. Investigaciones han demostrado un error muy alto, causado por multipath, de hasta  $\pm 15$  cm. Por ello es importante evitar la propagación multipath.

Para minimizar los efectos se pueden tomar las siguientes medidas:

- Seleccionar las estaciones de observación con cuidado, evitando reflectores cercanos
- Usar antenas diseñadas con cuidado (microstrip, choke, cavity backed), empleando planchas de base de antena
- Usar material absorbente cerca de la antena.

### **3.4. ERRORES RELATIVOS AL RECEPTOR.**

#### **3.4.1. Error del reloj**

Dado que en la información que nos llega de los satélites, estos nos transmiten el tiempo exacto en el que empezaron a emitir su mensaje codificado, y que los receptores miden, también, el tiempo exacto en el que recibieron cada señal, podremos calcular una medida de distancia entre el receptor y el satélite, conociendo la velocidad de propagación de la onda y el tiempo transcurrido desde

que se emitió la señal hasta que fue recibida. El problema surgirá cuando los relojes del satélite y el receptor no marquen el mismo tiempo.

Notemos lo importante que es este tema que un microsegundo de desfase se traduce en un error de 300 metros en la medición de la distancia.

Cuando un receptor recibe una señal de un satélite, en ese momento su reloj interno tendrá un desfase o error con respecto a la Escala de Tiempo. Este error afectará a todas las medidas de pseudo distancias realizadas para cada época.

Los errores en los osciladores de los receptores los podemos eliminar trabajando con posicionamiento relativo por medidas de fase, planteando las ecuaciones de dobles diferencias.

#### **3.4.2. Error en el estacionamiento de la antena**

Los errores en el estacionamiento de la antena tienen menos influencia y las exigencias de estacionamiento son muy inferiores a las de los instrumentos de observación clásica. No necesitan una altísima estabilidad, ya que pequeños desplazamientos, vibraciones o torsiones en nada afectan a la observación de las señales de los satélites.

#### **3.4.3. Errores en la manipulación de los equipos**

Los errores de manipulación se producen cuando no se siguen las instrucciones del fabricante del instrumento o cuando éstas suelen descuidarse cuando se trabaja rutinariamente. Por ejemplo, es importante no comenzar una observación hasta que no se hayan sincronizado perfectamente todos los satélites, ya que lo único que estaremos haciendo es introducir ruido a la observación.

#### **3.4.4. Variación del centro radioeléctrico de la antena**

La variación y desfase del centro de la antena se debe a la falta de coincidencia entre el centro radioeléctrico o punto que realmente se posiciona, ya que es el punto al que llega la señal; y el centro mecánico o físico, generando un error residual por excentricidad que puede ser de unos milímetros. Para evitar este error en posicionamiento relativo se recomienda una orientación aproximada

común para todas las antenas, ya que el fabricante monta en el interior de todas las carcasas el elemento físico receptor en la misma posición respecto a alguna referencia exterior del conjunto, y trabajando en modo diferencial este error se eliminará en ambas estaciones.

### 3.5. DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN

El efecto de la posición relativa de los satélites en relación al receptor es conocido como número DOP o dilución de la precisión.

La geometría de los satélites visibles es un factor importante a la hora de conseguir altas precisiones en el posicionamiento de un punto. Dicha geometría cambia con el tiempo como consecuencia del movimiento orbital de los satélites.

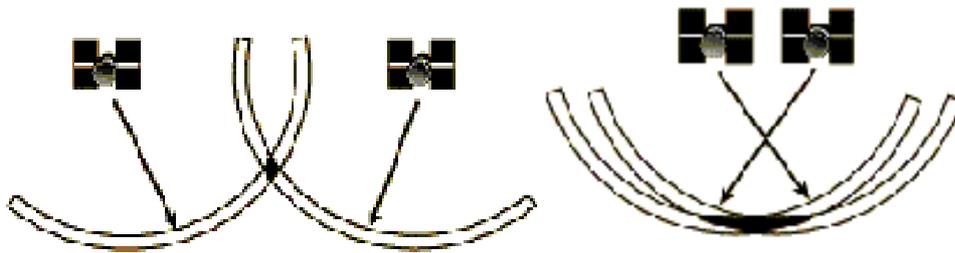


Figura 35: Efecto de la geometría de los satélites en la ubicación de un punto. (Obsérvese el área de intersección).

Un factor que mide la bondad de esta geometría es el denominado factor de dilución de la precisión (dilution of precision, DOP).

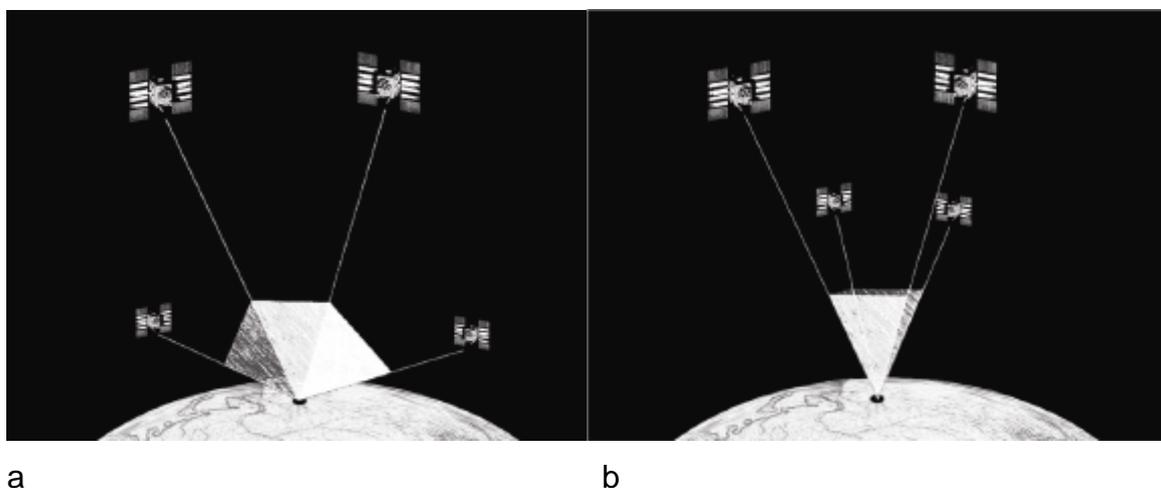


Figura 36: Esquemas de PDOP favorable (a) y desfavorable (b)

El valor del DOP puede ser interpretado geoméricamente como el volumen del cuerpo formado por los satélites y el receptor. Cuanto mayor sea el volumen de este cuerpo mejor será la geometría, y por lo tanto menor será el valor del DOP, siendo el valor ideal la unidad.

Como ya se vio anteriormente, el valor del DOP es el factor por el que debe ser multiplicado el error obtenido en las pseudo distancias para obtener el error final en el posicionamiento. Los valores de DOP más utilizados son los siguientes:

- \* GDOP: Dilución de precisión en posición y estado del reloj.
- \* PDOP: Dilución de precisión en posición.
- \* TDOP: Dilución de precisión en el estado del reloj.
- \* HDOP: Dilución de precisión en planimetría.
- \* VDOP: Dilución de precisión en altimetría.
- \* RDOP: Dilución de precisión relativa entre dos puntos.

La geometría de la constelación de satélites influye mucho en el error. Si el usuario se encuentra en un lugar donde las rectas que le unen con los satélites son casi perpendiculares entre ellas, el área de incertidumbre de intersección será mucho menor. Si los ángulos no son perpendiculares el área de incertidumbre será mayor. En el último caso se dice que presenta una geometría pobre, y la exactitud puede ser 10 veces peor que con buena geometría. Esa influencia de la geometría se expresa con el parámetro GDOP (Geometrical Dilution Of Position) que multiplicado por los demás errores da el error total cometido

Tabla 2: Resumen de las fuentes de error del sistema GPS

<b>Fuentes de Error</b>	<b>GPS Standard</b>	<b>GPS Diferencial</b>
Reloj del Satélite	1.5	0
Errores Orbitales	2.5	0
Ionosfera	5.0	0.4
Troposfera	0.5	0.2
Ruido en el Receptor	0.3	0.3

Señal Fantasma	0.6	0.6
Disponibilidad Selectiva	30	0
<b>Exactitud Promedio de Posición</b>		
Horizontal	50	1.3
Vertical	78	2.0
3-D	93	2.8

*Errores típicos, en Metros*

### 3.6. CONCLUSIÓN

En función de todo lo aquí visto, no parece descabellado el comentario de que cualquier Empresa de nuestro ramo que no emplee la tecnología GPS en uno o dos años, no podrá ofrecer precios competitivos en los muchos trabajos en los que se pueda aplicar esta nueva técnica.

Pero tampoco debemos caer en demagogias y creer que el GPS antes o después será una panacea. De hecho solo podremos realizar una navegación muy precisa o dar coordenadas de puntos con amplias posibilidades, pero supeditando siempre el grado de precisión a la duración de la observación.

Por otro lado, las técnicas clásicas seguirán siendo vigentes, aunque siempre cada vez más apoyadas, y lo que es más interesante, homogeneizadas, al disponer siempre de un sistema de referencia tan estable y eficaz como el que ofrece el GPS en las aplicaciones Geográficas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Basics of High-Precision Global Positioning System, JAVAD 1998.  
TOPCON.

Cordova, E. V., 1992, La Fotografía Aérea y su aplicación a estudios geológicos y geomorfológicos. Universidad Mayor de San Andrés. Tomo I, La Paz, Bolivia. 823p.

Documentos de Internet publicados por el Laboratorio Lincoln de Massachusetts, el Coordinational Scientific Information Center ruso y por el DLR-DFD Neustrelitz Remote Sensing Ground Station en Alemania, Noviembre 1997.

Franco, Antonio Rodríguez, precisión en la determinación de la altitud por los gps's, Junio 1999

García del Poso, A., et al. 1992. GPS. La nueva era de la Topografía. Editorial Ciencias Sociales. Madrid, España.

Gil Perez Fraile, L., 1997, Como utilizar un GPS. Editorial Risko. Madrid, España.32 p.

GPS Electronics innovations and features, 2000, Topcon Positioning System.

GPS Guide for beginners, 2000, Garmin Corporation.[www.garmin.com](http://www.garmin.com)

Hofmann-Wenllenhof, B., 1994, GPS Theory and Practice, Springer

Holanda Blas, M.P., Bermejo Ortega, J.C., Hernanz Villalba, P., Gómez Sánchez, F., Madrid 1997, Estudio de la precisión que el sistema GPS proporciona en cada una de sus cinco observables y comportamiento de las

mismas en función de diversos condicionantes para la medida de líneas base en un amplio rango de distancias.

Holanda Blas, M<sup>a</sup> Paz, Bermejo Ortega Juan Carlos, 1998 GPS & GLONASS descripción y aplicaciones madrid, 67 pag.

Introduction to the Russian GLObal NAVigation Satellite System GLONASS, 2000, German Aerospace Center.

Langley, R., GPS Receiver System Noise, in GPS World of June 1997.

Langley, R., Review and Update of GPS and GLONASS, in GPS World of July 1997.

Langley, R., The GPS Error Budget, in GPS World of March 1997.

Leick, A., 1996, GPS Satellite Surveying, Wiley-Interscience, New York.

Manual de operaciones Magellan GPS ProMARK X. 1995. Magellan systems corporation. U.S.A.

Mikhail, E. M., 1981, Analysis and Adjustment of Survey Measurement, Van Nostrand Reinhold, New York.

Moldes, F. J., 1995, Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica, Editorial Ra-ma. Madrid, España, 185 p.

Núñez-García, A., Valbuena Durán, J.L., Velasco Gómez, J., 1992, GPS La Nueva Era de la Topografía, Ediciones de las Ciencias Sociales, Madrid.

Puch, C., 2000, Manual Práctico de GPS, Introducción al sistema global de Posición. Editorial Desnivel. Madrid, España. 189 p.

Scanvic, J. Y. 1989, Teledetección Aplicada.. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 200 p

Surveying with TPS, August 14, 2000, Topcon Positioning System  
<http://www.javad.com>.

Trimble Navigation Limited, Como funciona el sistema GPS, en cinco pasos lógicos, 1999.

### **Links referidos al tema**

Base de datos de imagenes en <http://www.oso.chalmers.se/~geo/glonass.html>

<http://lareg.ensg.ign.fr/ige>

<http://www.glonass.org>

[http://cddis.gsfc.nasa.gov/920\\_1/SGAPO.html](http://cddis.gsfc.nasa.gov/920_1/SGAPO.html) (sistema VLBI)

<http://personales.mundivia.es/edomenecht/docs/gpsweb/introgps/introgps.htm>

<http://satnav.atc.ll.mit.edu/papers/LLjournal/Misra.html>

<http://satnav.atc.ll.mit.edu/papers/PZ90-WGS84/PZ90-WGS84.html>

<http://www.aerocivil.gov.co/telecom/cns/cns.htm>

[http://www.al-top.com/al\\_top/Gps-art.htm](http://www.al-top.com/al_top/Gps-art.htm) , 2000, Curso de Introduccion al GPS, AGUSTIN LOPEZ DOVAL , AL-TOP, TOPOGRAFIA, S.A.

<http://www.gva.es/icv/GLOSARIO.HTM> Instituto Cartográfico Valenciano.

<http://www.humanas.unal.edu.co/geografia/geotest/estudiantes/estudiantes.htm>

<http://www.imasd-tecnologia.com/imasd/mayo00/0500ti1.htm>

<http://www.isa.cie.uva.es/gps/GPSindex.html>

<http://www.tel.uva.es/~jpozdom/telecomunicaciones/tutorial/contenido.html>

Integrated Use of GPS and GLONASS: Transformation between WGS 84 and PZ-90