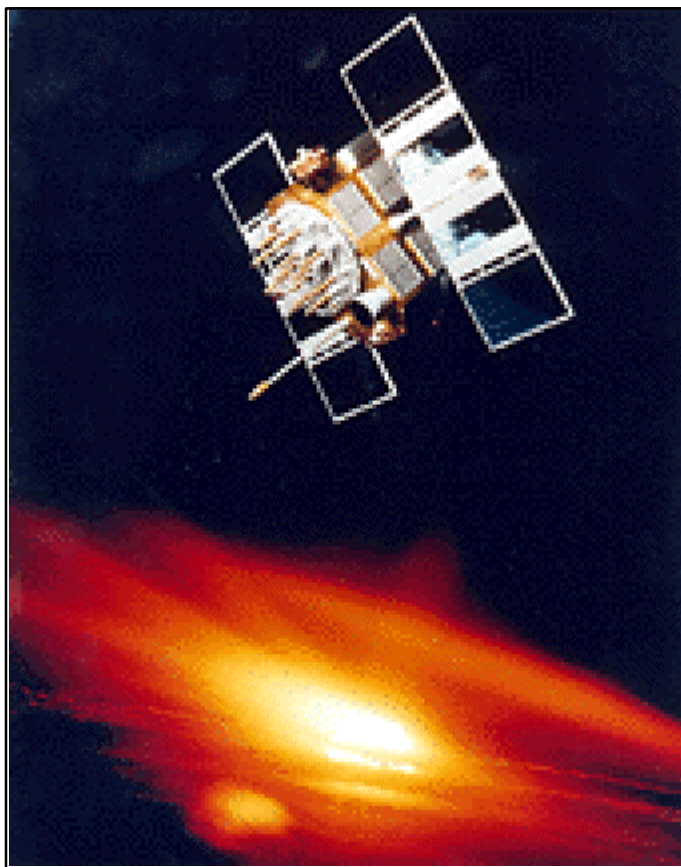


Universidad Nacional

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL



Jorge Fallas

Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica

**Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales
Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica**

jfallas@racsa.co.cr

www.una.ac.cr/ambi/telesig

2002

Sistema de Posicionamiento Global

INDICE

Introducción.....	1
Descripción del Sistema de Posicionamiento Global Satelital	2
¿Cómo determina el georeceptor la posición?	6
Triangulación espacial.....	8
Fuentes de error	9
Rutas múltiples	10
Receptor.....	11
Disponibilidad selectiva(SA): Fuente histórica en la degradación de la señal	11
Procesamiento de los datos	12
Operación en modo diferencial	13
WAAS: Corrección diferencial satelital.....	14
¿Cómo funciona WASS?.....	17
¿Cómo configurar su receptor para recibir señales WAAS?	19
Error esperado para receptores WAAS	20
WAAS y los receptores Garmin	20
Medidas de precisión proveídas por el receptor.....	21
Dilución de la precisión (DOP).....	21
Dilución de precisión geométrica (GDOP).....	21
Evaluación de la precisión y exactitud en posicionamiento	23
Evaluación de la precisión.....	23
Probabilidad de error circular (CEP).....	23
Desviación estándar de la posición horizontal (DEPH)	24
Evaluación de la Exactitud	25
Error horizontal en X y Y	25
Error radial.....	26
Nuevos receptores manuales: mejor precisión y exactitud.....	28
Rutas múltiples (reflejo)	28
Proceso de la señal	28
Anillos de rechazo de rutas múltiples.....	28
Elección de un receptor manual.....	28
Especificaciones técnicas del Garmin 12XL	29
Especificaciones técnicas del Garmin GPS III Plus.....	31
Especificaciones técnicas del Magellan Colourtrak.....	32
La nueva tecnología de muñeca: el Casio Pathfinder NAVI (Reloj y receptor GPS en uno)	32
Reptores GARMIN equipados con WAAS	33
Precisión en las lecturas de algunos receptores manuales	34
Receptor Path Finder Plus de Trimble	34
Receptor Magellan Pro.....	37
Garmin III+.....	38
Garmin Etrex Vista	40
El futuro del sistema GPS	44
Bibliografía.....	44
Sitios web de interés	46

Sistema de Posicionamiento Global



Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global (SPG) tiene su origen en el antiguo sistema de posicionamiento espacial de la Marina de los Estados Unidos denominado “TRANSIT”. El objetivo de dicho sistema era posicionar tanto submarinos con misiles balísticos como embarcaciones militares. El sistema estaba formado por cinco satélites con órbitas polares casi circulares y a una altura de 1100 km que transmitían señales a 150 y 400 MHz. El usuario(a) podía utilizar un satélite a la vez y debía esperar 100 minutos para tener acceso a otro satélite; una vez que tenía recepción el sistema requería entre 10 y 15 minutos para determinar la posición.. El sistema fue utilizado por los submarinos de los Estados Unidos de América para determinar su posición y ajustar su sistema de navegación. A partir de 1967 el sistema se empezó a utilizar de forma muy limitada en el sector civil (navegación marítima y geodesia) y dejó de operar en 1996; un año después de haberse declarado operacional el sistema GPS (Enge y Misra, 1999). El primer satélite fue puesto en órbita en 1960 y el último en 1965 y aun cuando el sistema representaba un avance significativo en el posicionamiento satelital, era lento, impreciso e intermitente y por tanto era inapropiado para posicionar misiles y para la navegación aérea. El desarrollo del actual SPG se inició en 1963 con la investigación contratada a la corporación “Aerospace” (El Segundo, California; USA) por parte de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América. Posteriormente en 1973 se estableció un programa conjunto entre la Fuerza Aérea, la Marina y la Infantería de los Estados Unidos; el cual culminó con el lanzamiento del primer satélite del SPG el 22 de febrero de 1978 (Bennett, 1990; www.af.mil/news/). El desarrollo del sistema costó US\$10 billones de dólares y su costo de mantenimiento y operación se estima en US\$250 a US\$500 millones de dólares (Enge y Misra, 1999).

El Sistema de Posicionamiento Global (SPG) fue designado originalmente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América como “Sistema de Navegación mediante Tiempo y Distancia” (*Navigation Satellite Timing and Ranging*; NAVSTAR, por sus siglas en inglés) y fue diseñado para proveer capacidad de navegación a las fuerzas militares de los Estados Unidos en aire, mar y tierra bajo cualquier condición climática. Un beneficio colateral el Sistema ha sido su aplicación en el área civil; incluyendo recreación, control vehicular, navegación aérea y marítima y levantamientos topográficos. Aplicaciones más sofisticadas incluyen el monitoreo del movimiento de las placas de la corteza terrestre en áreas de alta sismicidad y la agricultura de precisión.

El GPS es otro ejemplo de tecnología desarrollada inicialmente con fines militares y que posteriormente ha beneficiado a la comunidad civil mundial. Los primeros once satélites (GPS1-1 a GPS1-11), conocidos como bloque I, se utilizaron para demostrar la factibilidad del Sistema de Posicionamiento Global. EL primer satélite del bloque I fue lanzado desde la base de la Fuerza Aérea de Vandenberg en California el 22 de febrero de 1978. En tanto que el primer satélite del bloque II fue puesto en órbita el 14 de febrero de 1989; iniciándose la fase de prueba final del sistema; los satélites del bloque 2A son una versión ligeramente mejorada de los satélites del bloque 2 (www.af.mil/news/). El contrato para construir los satélites de la segunda generación conocidos también como Bloque II (IIA y IIR) fue asignado a la compañía Rockwell International-Seal Beach Division-USA en 1983. El primer satélite de la serie fue puesto en órbita el 14 de febrero de 1989 y el último el 9 de diciembre de 1996. Los nuevos satélites del bloque IIF iniciarán su periodo de

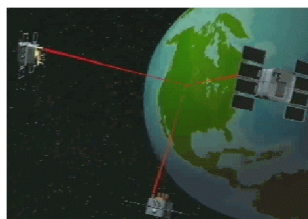
operación el en año 2002 y entre las mejoras planeadas están relojes atómicos digitales de mayor exactitud y posiblemente con un mecanismos de auto corrección.

El sistema utiliza el principio de triangulación a partir de la posición de cada uno de los satélites que forman la constelación de NAVSTAR (efemérides) y del tiempo requerido por una señal de radio emitida por el satélite en alcanzar un receptor en Tierra. EL SPG fue diseñado para estimar posición (lat, long y elevación) en mar, tierra y aire; velocidad y tiempo; así como navegar de un sitio a otro. En términos cuantitativos, esto se interpretó como un Sistema capaz de tener una raíz del error medio cuadrático en posición de 10m, en velocidad de 0.1m/s y en tiempo de 100 nanosegundos. Las normas de Seguridad Nacional de los Estados Unidos de América le permitían a los usuarios del sector civil posicionarse con un error de 500m en los años 70s, luego a partir de 1990 y hasta el 1 de mayo del 2000 dicho valor se redujo a 100m (SA activa) hasta llegar en la actualidad (año 2002) a unos 5 a 10m. En el año 1991, el gobierno de los Estados Unidos de América se comprometió formalmente con la Sociedad Internacional de Aviación Civil (ICAO, por sus siglas en Inglés) ha permitir el libre acceso y de manera gratuita al sistema GPS a nivel mundial.

Para el año 2000 se esperaba que aproximadamente 17000 aviones militares de los Estados Unidos estarían equipados con receptores de SPG y que más de 100.000 receptores manuales se estarían utilizando en vehículos y fuerzas terrestres de los Estados Unidos. La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos espera que para el año 2005 el mercado del SPG llegue a los \$30 billones de dólares (www.af.mil/news/).

En la actualidad se pueden adquirir receptores de SPG desde US\$100, sin embargo esto aparatos han sido diseñados para fines de navegación y por lo tanto su exactitud es de alrededor de 15m. Los receptores en el ámbito de US\$3000-500 pueden proveen exactitudes de hasta 5 cm en modo diferencial satelital (Ver WASS).

Descripción del Sistema de Posicionamiento Global Satelital



El primer satélite GPS fue puesto en órbita el 22 de febrero de 1978 y para diciembre de dicho año ya se contaba con cuatro satélites; los cuales permitían realizar pruebas de posicionamiento en 3D en un área limitada del Planeta. La constelación GPS está formada 24 unidades operacionales (sin incluir satélites de respaldo) con órbitas circulares de 12 horas con una inclinación de 55 grados y ubicados a una distancia de 26.560Km de la Tierra que se desplazan a una velocidad de aproximadamente 4km/s; sin embargo su posición instantánea puede estimarse con un error de unos cuantos metros con una antelación de 24 a 48 h. Los satélites están organizados en seis planos orbitales con cuatro satélites por órbita (Fig. 2). La constelación de 24 satélites se completó el 9 de marzo de 1994 y el sistema fue declarado operacional por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América en 1995.

Los satélites están ubicados de tal forma que el usuario puede recibir en promedio la señal de al menos seis satélites un 100 por ciento del tiempo en cualquier parte de la Tierra. Cada satélite está equipado con dos relojes atómicos, uno de cesio y otro de rubidio, los cuales proveen frecuencias de referencia utilizadas para generar señales muy precisas y sincronizadas. La estabilidad de la

frecuencia de dichos relojes es de una parte en 10^{14} para el cesio y una parte en 10^{13} para rubidio; si los relojes no se corrigieran diariamente acumularían un error de 1 a 10 nanosegundos por día. Sin embargo, esta es parte de las funciones de las estaciones de control terrestre. Dichas estaciones determinan el error de los relojes y retransmiten ajustes a cada satélite para que este a su vez lo retransmita a los receptores en Tierra.

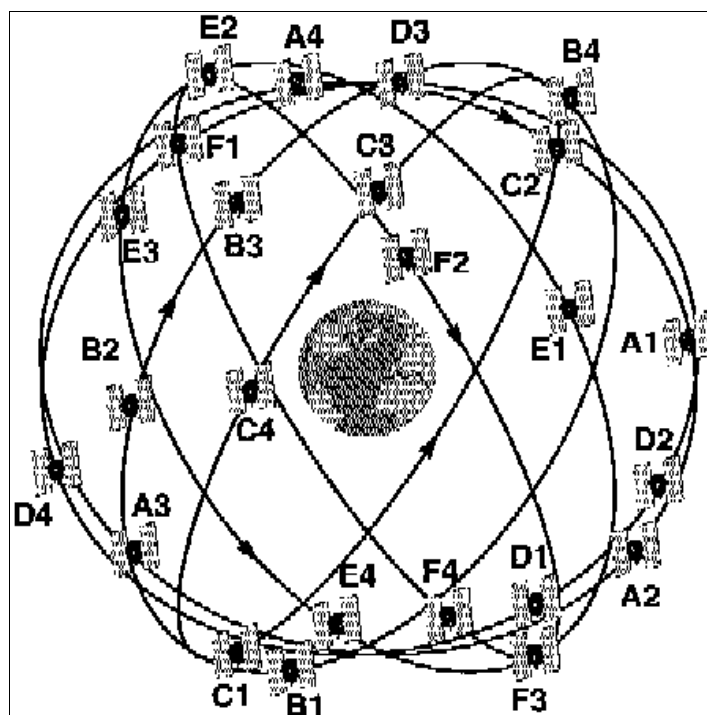


Figura 1: Constelación GPS. Los satélites están distribuidos en seis órbitas con una inclinación de 55° con respecto al ecuador y con cuatro satélites por órbita. Fuente: Enge y Misra, 1999.

El SPG está conformado por tres componentes o segmentos: el espacial (satélites), el de control (estaciones terrenas) y el usuario (receptores) (Bennett, 1990) (Fig. 2). Las 5 estaciones de tierra están distribuidas a distancias similares alrededor del ecuador (Isla Ascensión, Diego García, Kwajalainy, Hawaii y Cloroado Springs) y tienen como fin monitorear el estado de los satélites (altura, estado de los relojes atómicos), realizar pequeños ajustes en sus órbitas y calcular las efemérides (posición) de los satélites. Esta información es transmitida a los satélites, los cuales a su vez la retransmiten a los receptores en tierra al menos una vez al día. El tercer componente es el usuario quien recibe las señales enviadas por los satélites mediante el uso de un receptor equipado con una antena. El usuario del SPG tendrá acceso a 6 o más satélites en un 96% del tiempo, a 8 satélites en un 32% del tiempo y a 9 satélites un 5% del tiempo. En muy pocas ocasiones se tiene acceso a más de 9 satélites. Si su receptor tiene capacidad de recibir señales del SPG y del sistema de la Federación Rusa denominado GLONASS (*GLObal Navigation Satellite Systems*) usted tendrá acceso a 9 o más satélites un 99% del tiempo. El sistema GLONASS tenía 14 satélites en operación en 1997 (Enge y Misra, 1999).

Los satélites radian dos códigos con diferentes grados de exactitud. El primero, denominada estándar (C/A, "Coarse-acquisition") está diseñado para uso civil y el segundo P (Preciso) diseñado

para uso militar. El código civil estaba sujeto hasta el 1 de mayo del 2000 a la Disponibilidad Selectiva (SA, por sus siglas en Inglés); esta era una degradación intencional en la calidad de la señal que radiaba el satélite ocasionada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos por razones de seguridad nacional. Esta degradación en la señal ocasionaba un error de posicionamiento de hasta 300m.

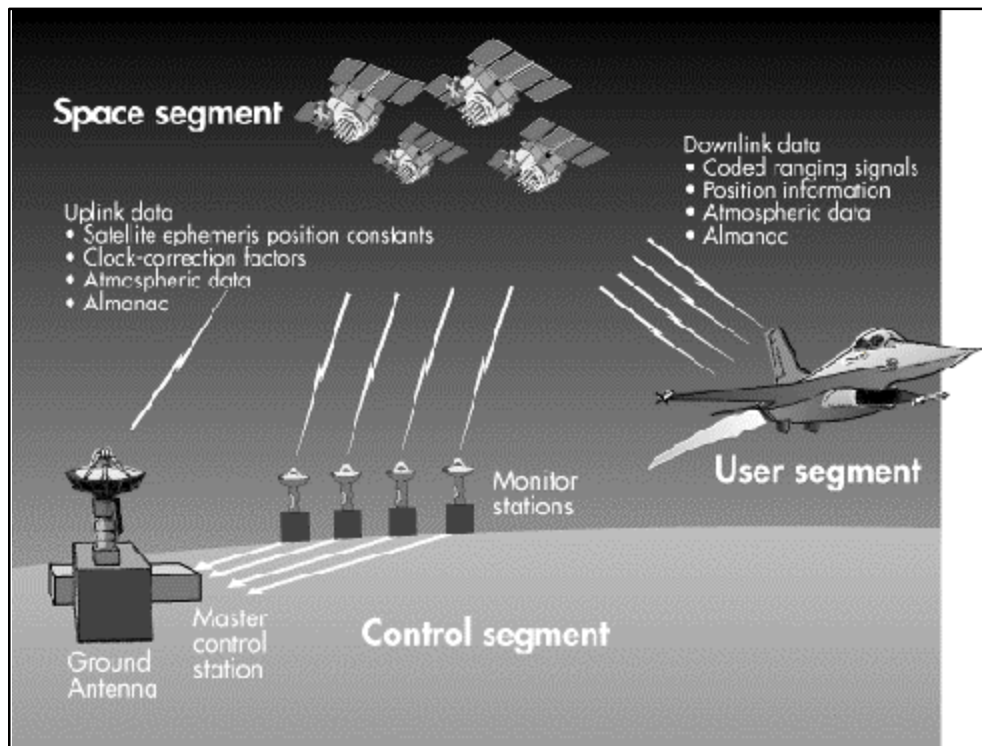


Figura 2: Segmentos del Sistema de Posicionamiento Global (SPG)

Cada uno de los satélites GPS transmite continuamente una señal utilizando dos frecuencias en la banda L: 1575.42 MHz (L1) y 1227.6 MHz (L2). La primera frecuencia ha sido designada para uso irrestricto del sector civil y es modulada por un código de ruido seudo aleatorio (PRN, por sus siglas en inglés) denominado código de adquisición/grueso o estándar (C/A, por sus siglas en inglés). Esta señal está formada por un código único con una longitud de 1023 bits que se repite cada milisegundo y 50bits por segundo de información sobre aspectos de navegación (Ej. órbita del satélite, reloj, estado del satélite, etc). En forma concurrente con el modo C/A, cada satélite transmite otras dos señales para usuarios autorizados del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (Ej. sector militar), una en la frecuencia L1 y otra en la frecuencia L2. El acceso a dichas señales es controlado mediante la encriptación de los códigos PRN. Las señales se denominan códigos “P” cuando no se encuentran encriptadas y código “Y” cuando están encriptadas (casi siempre). Al modo de operación C/A (civil) se le conoce como *Servicio de Posicionamiento Estándar* (SPS, por sus siglas en inglés) y al modo de operación restringido *Servicio de Posicionamiento Preciso* (PPS, por sus siglas en inglés).

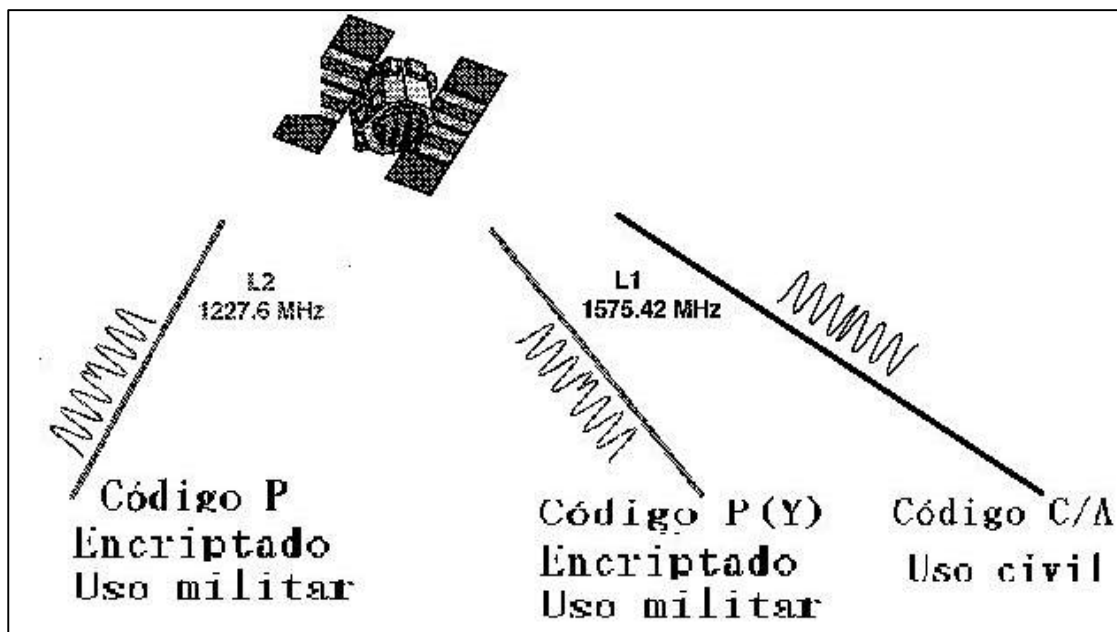
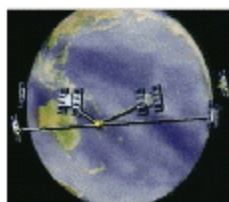


Fig. 3. Cada satellite de la constelación GPS transmite en dos frecuencias de la banda L. La señal que transmite el código C/A es utilizada en forma irrestricta por el sector civil en tanto que el acceso al código P está restringido a usuarios autorizados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. Los usuarios civiles pueden tener utilizar el código P(Y) pero sin tener acceso al código de seguridad.

El receptor en tierra debe recibir la señal de al menos 3 satélites para lograr determinar su posición. Este modo se llama 2D y permite determinar la ubicación a partir de un valor de elevación que le provee el operador. Este modo no es recomendado ya que errores de menos de 5 metros en elevación pueden ocasionar errores de posición de hasta 100 metros. El modo de uso más frecuente se denomina 3D. En este caso el receptor recibe señales de al menos 4 satélites visibles desde la posición del receptor. Recordemos que la antena es el sitio donde se recibe la señal y por lo tanto el observador puede estar más abajo o más arriba de la antena. Los primeros receptores tenían problemas recibiendo las señales en ambientes forestales. Por ejemplo, Wilkie (1989) reporta que no pudo determinar su posición cuando la cobertura de copas excedió el 30% o el ángulo de visión era superior a 50° . Solo tuvo éxito en claros del bosque con un área superior a los 1250 metros cuadrados y con un ángulo con el horizonte inferior a 30° . Los receptores actuales han mejorado sus circuitos y por lo tanto es posible determinar la posición del receptor en ambientes con coberturas de copa de hasta 100% (Fallas, 2001). El autor ha realizado mediciones exitosas con SPG en los bosques de La Selva, Sarapiquí; Tortuguero; Punta Cocles; Península de Nicoya, Cahuita y el bosque de la cordillera Volcánica Central. Un aspecto que degrada la señal es el contenido de humedad de las copas. También he tenido dificultades con la recepción bajo condiciones de llovizna en el macizo del Barba (Cordillera Volcánica Central), aun a campo abierto y sin que la topografía obstruya la visibilidad de los satélites.

Los receptores no geodésicos con un precio de alrededor de US\$2000 tienen la capacidad de registrar archivos para cada punto. Normalmente es recomendable obtener de 150 a 180 registros por punto. Estos archivos son posteriormente trasladados a la computadora para su procesamiento. El software que acompaña al receptor o cualquier otro programa compatible con el receptor permite calcular el promedio, la desviación estándar, el valor máximo y mínimo; así como el error circular probable (CEP) para cada localización. En el caso de elementos lineales tales como caminos o linderos de fincas que se registran al desplazarse con el receptor activado, el software permite crear arcos o líneas que posteriormente son exportadas a un SIG. Esta funcionalidad puede lograrse con los receptores de bajo costo utilizando la función de registro del “TRACK” (recorrido).



¿Cómo determina el georeceptor la posición?

La ubicación de cualquier punto es posible cuando se tiene un sistema de referencia en el cual se conoce la posición exacta del punto de inicio del sistema. El sistema de Posicionamiento Global Satelital requeriría de un sistema de referencia mundial fijo, o sea, de un sistema de coordenadas que permitiera determinar la posición de cualquier punto sobre la Tierra sin ambigüedad. De los sistemas disponibles, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos eligió el sistema de coordenadas geocéntrico conocido como WGS84 (World Geodetic System 1984); el cual fue creado por la antigua Agencia de Cartografía Militar de los Estados Unidos (actualmente parte de NIMA “National Imagery and Mapping Agency”). Este sistema de referencia mundial tiene la gran ventaja de que no depende de un datum geodésico local como los sistemas de referencia propios de un país o de una región. Al utilizar datos de un georeceptor con la cartografía local, el usuario(a) debe seleccionar el datum apropiado ó realizar posteriormente la transformación de datum. Por ejemplo, en el caso de Costa Rica si usted utiliza los datos de su receptor de GPS configurado con el datum WGS84 con la cartografía del Instituto Geográfico Nacional obtendrá un error de 274m en posicionamiento.

Una vez definido el sistema de referencia, solamente se requiere conocer la distancia de tres puntos de referencia para poder estimar la posición de un objeto. Bajo condiciones normales, para determinar el tiempo transcurrido entre la transmisión de una señal por un emisor y la recepción de la misma por un receptor es necesario que tanto el reloj del emisor como el del receptor estén sincronizados. Sin embargo, este requerimiento puede obviarse en el sistema de Posicionamiento Global Satelital gracias al uso de un satélite extra al realizar la determinación de posición. Los georeceptores no poseen relojes atómicos sino de cuarzo y por tanto su exactitud es inferior a los primeros. Esto ocasiona que se introduzca un sesgo en la medición del tiempo (lo subestima o lo sobre estima); sin embargo este error es el mismo para todos los satélites. Debido a este error las lecturas de tiempo se denominan “seudo rangos” (el término rango indica la diferencia entre dos valores: valor final-valor inicial). Para resolver esta incógnita en el sistema se requiere utilizar un sistema de ecuaciones con 4 incógnitas: una representa la ubicación en X, otra la ubicación en Y, una tercera la elevación y la cuarta el error en el reloj del receptor. Por esta razón el usuario(a) requiere de al menos cuatro satélites para realizar una localización en 3D (X,Y,Z) (Fig. 4).

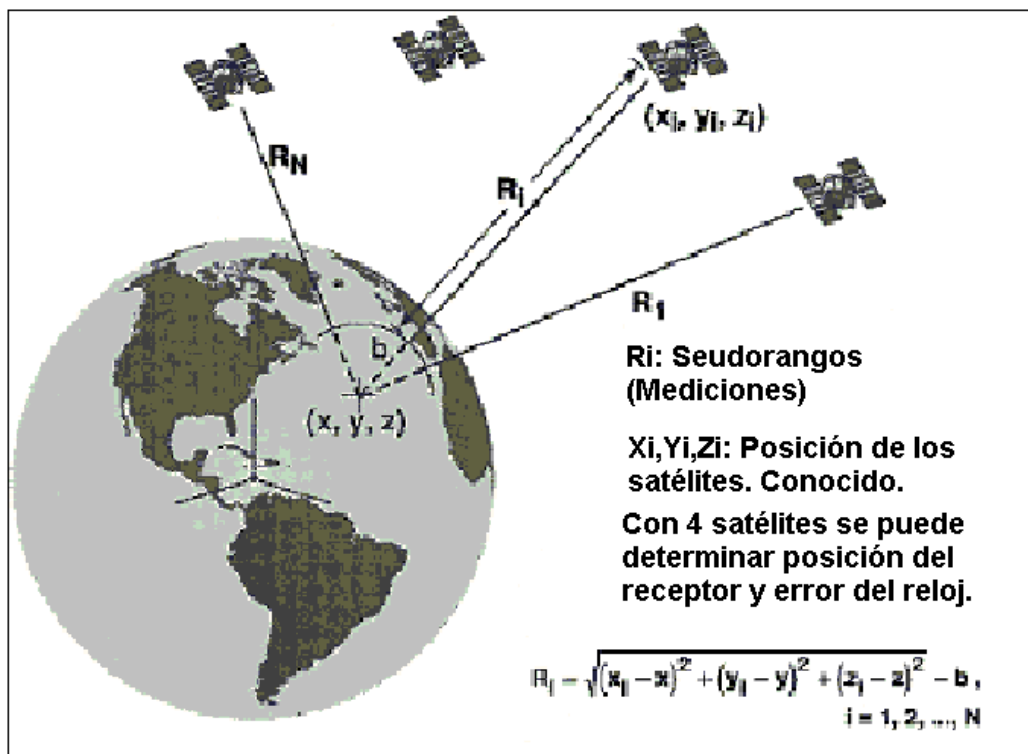


Figura 4: Representación idealizada de la geometría de los satélites y de la medición de pseudo distancias. Fuente: Enge y Misra, 1999.

La medición de pseudo rangos es un proceso conceptualmente simple que consiste en correlacionar dos señales con una estructura conocida. El código “PRN” transmitido por cada satélite es único y conocido por el georeceptor, el cual a su vez genera una réplica del mismo. El receptor está diseñado para “trasladar” la señal que ha generado hasta que coincida con la señal producida por el satélite (correlación entre las dos señales). La diferencia en tiempo entre el código generado por el satélite y la réplica generada por el receptor es el tiempo aparente de viaje de la señal. Una vez que se ha determinado dicha diferencia solo tiene que multiplicarse por la velocidad de la luz para estimar la pseudo distancia entre el receptor y el satélite. Dado que el reloj de cuarzo del receptor es menos preciso que el reloj atómico del satélite, el tiempo estimado de viaje de la señal tiene un sesgo (sobre ó sub estimación); sin embargo esto aplica por igual a todos los satélites y por ende puede corregirse utilizando la señal proveniente de un cuarto satélite. Cuantos más satélites tenga disponible el georeceptor, mejor será la estimación de posición que pueda realizar, ya que puede elegir los satélites con la mejor geometría.

El cambio en el efecto Doppler, causado por el movimiento relativo del satélite y del usuario, puede convertirse en una tasa de pseudo rango y a partir de la tasa de cambio de 4 satélites y sus respectivos vectores de velocidad (transmitidos en el mensaje de navegación) es posible determinar la velocidad a la que se desplaza el usuario.

Triangulación espacial

Cada satélite envía una serie de señales codificadas que los receptores en tierra pueden decodificar y de esta manera estimar el tiempo que tardó la señal en viajar desde el satélite Navstar-GPS (emisor) hasta el receptor. Posteriormente el receptor determina la diferencia en tiempo y finalmente utilizando la velocidad de la luz determina la distancia.

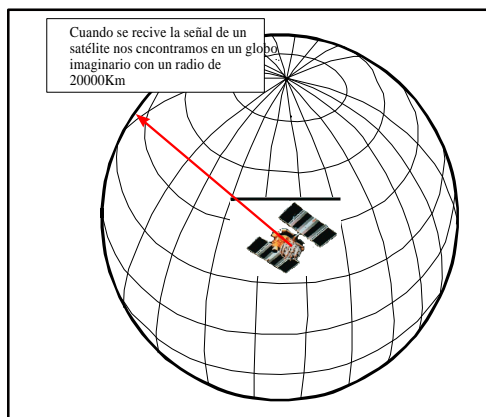
$$\text{Distancia} = (T1 - T2) * 300.000 \text{ km/s}$$

en donde:

T1: Tiempo en que es emitida la señal por el satélite

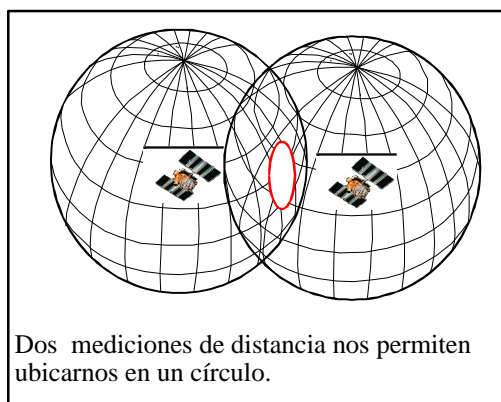
T2: Tiempo en que es recibida la señal por el receptor en tierra

El receptor en tierra utiliza el tiempo de viaje de la señal enviada por el satélite para determinar su distancia. Veamos porqué se requieren al menos tres satélites para determinar la posición de un punto sobre la superficie de la Tierra.



1. Un satélite

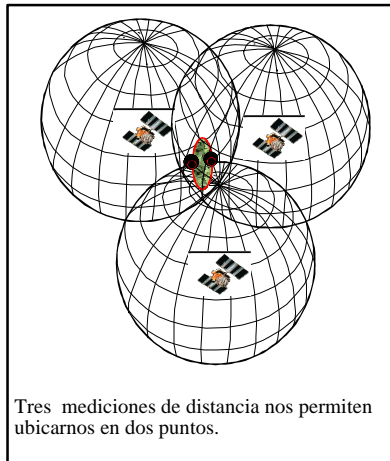
Cuando se recibe la señal de un satélite sabemos que nos encontramos dentro de una esfera imaginaria cuyo radio es de 26.560Km. Esto nos ubica en algún sector del Sistema Solar; sin embargo no es lo suficientemente exacto como para resolver nuestra necesidad de saber donde nos encontramos en la Tierra.



2. Dos satélites

A partir de la lectura de distancia de dos satélites es posible definir dos esferas cuya área común define a su vez un tercer círculo. Este círculo define el lugar en donde nos encontramos en el Universo. Aún cuando hemos reducido la incertidumbre con respecto a nuestra posible ubicación, todavía no es lo suficientemente exacta como para resolver nuestra necesidad de saber donde nos encontramos.

3. Tres satélites

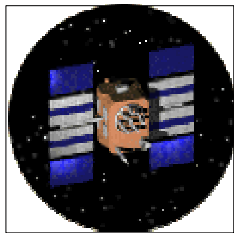


La adición de un tercer satélite creará una tercera esfera que a su vez interceptará a las dos primeras en dos puntos. De esta manera el receptor ha reducido su posible ubicación a dos puntos en la Tierra. Para definir cuál de los dos puntos es el apropiado se requiere de un cuarto satélite, el cual formará otra esfera cuya circunferencia tocará sólo uno de los dos puntos ya definidos. En la práctica, el cuarto satélite se utiliza para sincronizar el tiempo del receptor con el tiempo del reloj atómico. De esta manera es posible utilizar relojes de bajo costo y menor precisión en los receptores manuales.

Fuentes de error

Las principales fuentes de error al utilizar un receptor del SPG son las siguientes:

Satélites



El Sistema de Posicionamiento Global permite determinar la ubicación de un receptor ubicado en la superficie de la Tierra basado en el tiempo que tarda la señal en llegar al mismo. Por esta razón los satélites están equipados con relojes atómicos de gran exactitud. Sin embargo los relojes no son perfectos y generan pequeños errores en la medición del tiempo. Un error en el reloj atómico del satélite de una billonésima de segundo (un nanosegundo) equivale a un error de 30cm en la medición de la distancia al satélite. Los relojes atómicos acumulan un error de 1 billonésima de segundo cada tres años. Un reloj atómico pesa 20 kilograms y cuesta unos US\$50.000.

Otro aspecto importante es la posición o ubicación de los satélites en el espacio; ya que es el punto de inicio para los cálculos que permiten en última instancia determinar la posición del receptor en la Tierra. Los satélites se ubican en órbitas circulares a aproximadamente 26560 Km de la superficie de la Tierra para evitar que la atmosfera o la gravedad desestabilicen sus órbitas. Sin embargo las órbitas no son perfectas y la posición de la constelación de satélites cambia con el tiempo. El error atribuible al reloj atómico es de 2.1m y a las órbitas del satélite 2.1 m.

Atmósfera



Los satélites del sistema NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*) transmiten su código a los receptores utilizando señales de radio que deben viajar a través de la ionosfera (50Km) y de la troposfera (200Km) de la Tierra (Fig. 5). A su paso por la atmósfera la velocidad de la señal cambia y por lo tanto se genera un error en la estimación de la distancia al satélite. Las señales de radio viajan a la velocidad de la luz (300.000Km/s) sin embargo su velocidad es constante solo cuando viaja en el vacío. En el mundo real su

velocidad no es constante y depende del medio por el cual se desplace. La señal de radio reduce su velocidad al pasar por la sección de partículas cargadas de la ionósfera y luego al entrar en contacto con el vapor de agua de la tropósfera. Dado que el receptor asume que la señal viaja a una velocidad constante esto introduce otra fuente de error en el cálculo de la ubicación. El efecto de la ionosfera es más acentuado durante el día que durante la noche y además tiene ciclos de 11 años. El ciclo actual alcanzó su pico máximo en 1998 y alcanzará su mínimo en el año 2004. Algunos receptores incluyen un algoritmo que compensa por los efectos atmosféricos, sin embargo dado la variabilidad en el tiempo y el espacio de las condiciones atmosféricas es prácticamente imposible que la corrección aplique en forma universal. El error atribuible a la ionosfera es de aproximadamente 4m. El efecto de la ionosfera puede eliminarse utilizando receptores de frecuencia doble (L1 y L2) o el modo de operación WAAS; sin embargo el de la troposfera no puede eliminarse.

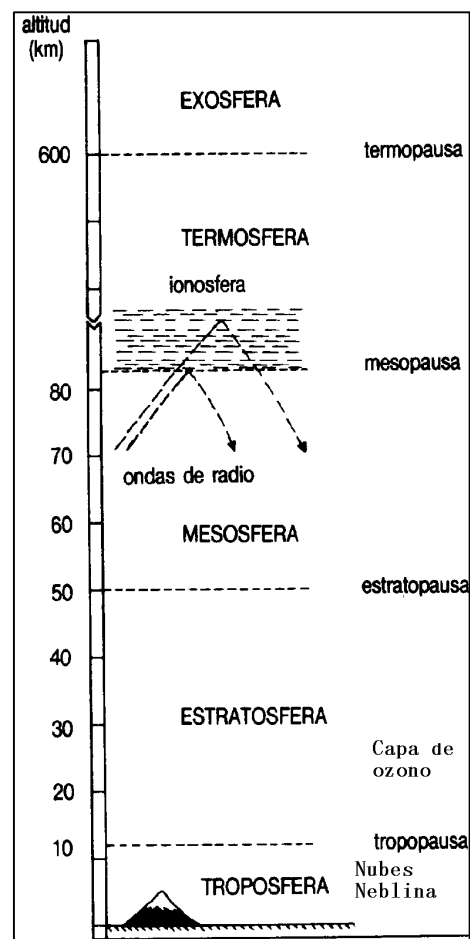


Figura 4: Capas de la atmósfera

Rutas múltiples



La señal que llega al receptor puede estar afectada por rutas múltiples. Normalmente, la señal directa llega primero al receptor (requiere de menos tiempo) y luego las que proceden de rutas múltiples. Esto puede ocasionar 'ruido' en la lectura que realiza el receptor y por lo tanto un error en el cálculo de su ubicación. El efecto de rutas múltiples es típico de ambientes forestales o de áreas urbanas. El efecto de fantasmas o imágenes dobles en la televisión es un ejemplo de señales de radio afectadas por rutas múltiples. El error asociado a rutas múltiples depende de las condiciones locales de trabajo. Las nuevas antenas poseen la capacidad de reducir sustancialmente el efecto de las rutas múltiples. El error atribuible a las rutas múltiples es de 1 metro. Las antenas externas de los nuevos receptores están equipadas con dispositivos para filtrar el efecto de las rutas múltiples.

Receptor



Los receptores están equipados con relojes de cuarzo para medir el tiempo. Debido a su precio y tamaño, estos relojes no son atómicos y por lo tanto no tienen la exactitud de los relojes que se encuentran en los satélites. Esta es otra fuente de error en el cálculo de la posición que realiza el receptor. La calidad del receptor dependerá de su precio y sus especificaciones técnicas; sin embargo en la mayoría de los receptores actuales el error es de aproximadamente 0.5m.

Disponibilidad selectiva(SA): Fuente histórica en la degradación de la señal

Por razones de seguridad nacional el Departamento de Defensa de los Estados Unidos implementó lo que se conoce como *disponibilidad selectiva* (en inglés SA) entre marzo de 1990 y 1 de mayo del 2000 (Fig. 6). La disponibilidad selectiva era una fuente de error intencional causada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) para asegurarse que 'fuerzas hostiles' no utilicen la exactitud del SPG contra los Estados Unidos o sus aliados (Bennett, 1990). El DoD tiene la capacidad de hacer que los satélites radien lecturas de tiempo erróneas y/o posiciones inexactas de sus órbitas. Esta es la fuente de error más importante para los usuarios de los receptores del SPG en el sector civil. La magnitud del error era de aproximadamente 100 metros (2drms-95%) (Bennett, 1990). Para eliminar el efecto adverso de SA se debe utilizar un receptor fijo o una estación base ubicada en una posición conocida y operarla en forma simultánea con el receptor móvil. Posteriormente, utilizando los datos del receptor fijo y su posición conocida se estima un factor de corrección, el cual es aplicado a los datos generados por el receptor móvil. Utilizando esta técnica, conocida como *corrección diferencial*, es posible lograr errores de 5 m y en algunos casos de hasta decímetros.

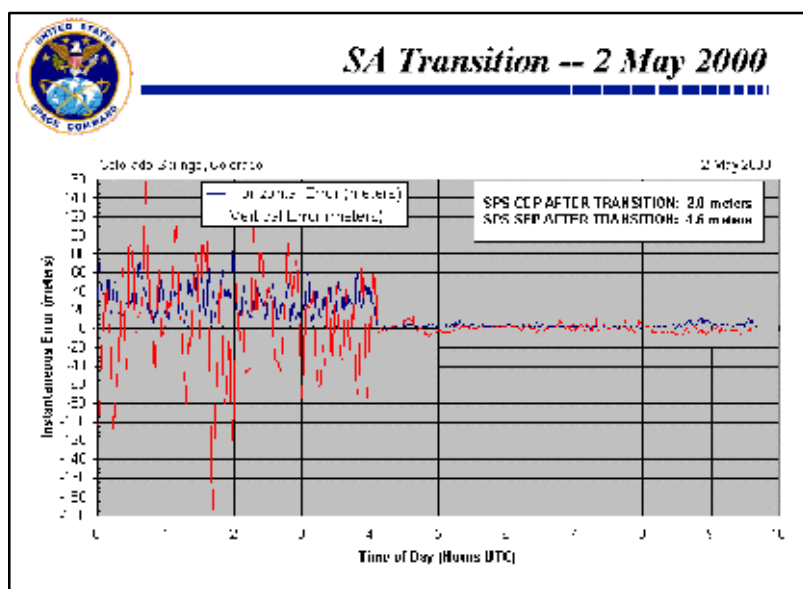


Figura 6 : Error esperado para los diferentes fuentes de error en el SPG.

Procesamiento de los datos



El procesamiento de los datos incluye las siguientes tareas:

- ?? Trasladar los archivos del receptor móvil a la computadora. Para esto se utiliza el software que acompaña al receptor o cualquier otro programa compatible con el receptor. Por ejemplo, si usted trabaja con receptores GARMIN puede utilizar el programa WAYPOINT+ o la extensión DNR_garmin creada por el departamento de Recursos Naturales del Estado de Minnesota, USA.
- ?? Visualizar los archivos para asegurarse de que todos los datos fueron trasladados exitosamente del receptor a la PC.
- ?? Calculo de estadísticos: El software permite calcular el promedio y la desviación estándar para cada archivo; así como el error circular probable (CEP). Esta información permite determinar la precisión de las lecturas realizadas. Recuerde que este valor sólo le indica la dispersión de la nube de puntos y no la exactitud con que se estima la ubicación de su punto de interés.
- ?? En caso de trabajarse en modo diferencial deben procesarse los archivos utilizando la opción diferencial proveida por el software.
- ?? Exportación de archivos en un formato compatible con un SIG (Ej. *.shp) o un CAD (Ej. DXF)
- ?? Combinación/edición de archivos. Por ejemplo es posible combinar varios archivos para crear uno compuesto.

A continuación encontrará un listado de algunos programas gratuitos y/o de bajo costo utilizados para el procesamiento de datos del SPG.

GARtrip <http://www.gartrip.de/> ; receptores Garmin GPS 12, 12XL, 12CX, 48, II, II+, III, III+, III Pilot, 40, 45, 38, 35, 75, 89, 90, Street Pilot, Emap and y eTrex ; Win95, 98, ME, 2000, NT. Shareware US\$30

Garmap, Freeware http://www.catnet.ne.jp/fukuda/garmap/e_garmap.html

GPS utility <http://www.gpsu.co.uk/download.html>

OziExplorer <http://www.oziexplorer.com/> Shareware, costo del registro US\$75

EasyGP <http://www.easygps.com/about.asp>

WayPoint + www.tapr.org/~kh2z/waypoint Programa gratuito para descargar y cargar puntos y rutas de un receptor Garmin. (Ver Fallas, 2002. Waypoint+: Manual).

WayPoint+Interface www.esri.com/arcscripts Extensión para ArcView GIS que permite leer los archivos creados por WayPoint+. (Ver Fallas, 2002. Waypoint+ Interface: Manual).

DNR_garmin.avx www.dnr.state.mn.us tim.loesch@dnr.state.mn.us Extensión para ArcView GIS creada por el departamento de Recursos Naturales del Estado de Minnesota, USA que permite descargar y cargar puntos y rutas de un receptor Garmin. (Ver Fallas, 2002. MN DNR Garmin: Manual).

Operación en modo diferencial

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) utiliza tiempo y la posición de la constelación de satélites NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*) para determinar la posición de un receptor sobre la superficie de la Tierra. La corrección diferencial se basa en el siguiente supuesto. Si usted tiene dos receptores a una distancia de 5km uno del otro; bajo esta condición uno podría esperar que los errores en posición causados por el reloj atómico del satélite, por la ionosfera y la troposfera afectarían de igual manera y con la misma magnitud a ambos receptores. Si uno conociera la posición exacta de uno de los receptores podría utilizar dicha información para determinar el error asociado a las lecturas de dicho receptor y luego aplicar dicha corrección al otro receptor. A esta corrección es lo que se conoce como operación en *modo diferencial* (Fig. 7). Los errores causados por rutas múltiples y por el receptor no pueden eliminarse mediante la corrección diferencial; ya que esta opera sobre aquellos errores que afectan simultáneamente a la estación de referencia y al receptor móvil. A continuación se explica en qué consiste el modo de operación diferencial.

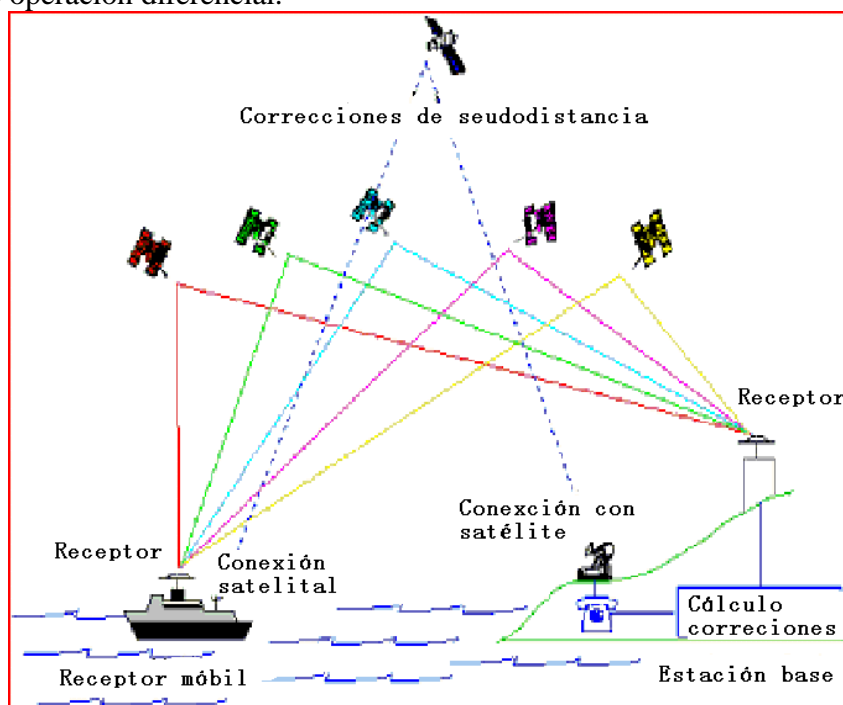


Figura 7 : El concepto de corrección diferencial

El aparato ubicado en la posición conocida recibe el nombre de *receptor base* y al segundo aparato se le denomina *receptor móvil*. La estación base determina la distancia entre cada uno de los satélites visibles y su posición (la cual es conocida) y luego determina el error asociado a la medición de distancia (error en distancia). Esta información es radiada al receptor móvil, el cual aplica la corrección al respectivo satélite, obteniendo de esta manera una posición más exacta. Cuando la corrección no se realiza en tiempo real, la estación base se conecta a una computadora y se registra la hora y el respectivo valor para el posterior procesamiento de los datos. La exactitud de la corrección dependerá de la exactitud con que se conozca la posición de la estación base. Otro aspecto importante es la distancia que separa al receptor móvil de la estación bases. En general, se espera que para receptores de doble frecuencia el error sea de un 1mm por cada kilómetro (1ppm-una parte por millón) de separación entre la estación base y el receptor móvil; para receptores de una frecuencia dicho valor se incrementa a 2mm por kilómetro (2ppm-dos partes por millón). El modo diferencial utilizando el código civil puede reducir el error en posicionamiento a decímetros dado que el receptor puede eliminar el efecto de las rutas múltiples. El modo diferencial removerá la mayoría de los errores excepto los asociados al receptor y a las rutas múltiples.

En un inicio se denominó al modo de operación diferencial basado en el código civil o C/A del sistema como DGPS (*Differential GPS*) y al modo basado en la diferencia entre las señales L1 y L2 como CPD (*Carrier Phase Differential*). La corrección en tiempo real basado en las señales L1 y L2 se ha denominado RTK (*Real-Time Kinematic*). El segundo método de corrección es más complejo que el primero y por tanto el receptor requiere de mayor tiempo inicial para su cálculo. Una vez determinadas las ambigüedades del ciclo inicial, los cálculos siguientes son instantáneos dado que se mantenga un mínimo de 4 satélites visibles. Por otro lado es posible obtener errores de milímetro con este método en tanto que el error es de decímetros con el primer método.

Los errores en la señal del SPG provienen de diversas fuentes tales como sesgos en el reloj del satélite, cambios en la órbita de los satélites y especialmente la trayectoria de la señal a través de la troposfera y la ionosfera. El error final es una combinación de estos factores y por tanto la señal tendrá un error variable, dependiendo de las características del sitio y la hora a la cual se realice la medición.

Los errores de los satélites cambian constantemente y por lo tanto no es suficiente con estimar el error para un momento dado y luego aplicarlo a las otras lecturas realizadas durante el día. Por esta razón es necesario mantener dos receptores trabajando en forma simultánea durante la totalidad de la toma de datos. Las correcciones pueden radiarse en tiempo real al receptor móvil o almacenarse en la computadora para luego procesar los datos del receptor móvil en tiempo diferido.

WAAS: Corrección diferencial satelital

La Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos de América (FAA, por sus siglas en inglés) ha implementado un sistema de corrección diferencial satelital denominado WAAS (Wide Area Augmentation System), el cual está diseñado para mejorar la capacidad de navegación basado en GPS del sector civil. El sistema de corrección diferencial satelital es denominado “WAAS” en los Estados Unidos de América y opera a partir de una red de estaciones de referencia o base que proveen una extensa área de servicio (Fig.8). En Europa el sistema se denomina EGNOS (Fig. 9) en tanto que en Asia y Japón MTSAT. Las señales de los satélites “GPS” son recibidas por las

estaciones base del sistema WAAS, las cuales calculan su posición basado en la señales de los satélites GPS y luego la comparan con la posición conocida de la estación; determinar si existe un error en posición y luego lo transmiten a una estación central en donde se realiza la corrección diferencial y se verifica la integridad del sistema. La información de corrección es radiada a un satélite de comunicaciones Geoestacionario; el cual a su vez la retransmite a los georeceptores ubicados en su área de cobertura utilizando la misma frecuencia del GPS (L1, 1575.42MHz). Cualquier receptor de GPS ubicado en mar, aire y tierra y equipado para recibir la señal lo puede hacer de forma gratuita. En el caso de aviones equipados con GPS, estos satélites de comunicaciones actúan como medios adicionales de navegación. En la actualidad solo el sistema de los Estados Unidos se encuentra en su fase operacional; los otros sistemas se encuentran en su fase de prueba.



Figura 8: Fase I de la implementación del Sistema WAAS. USA. Fuente: Dale, 2002.

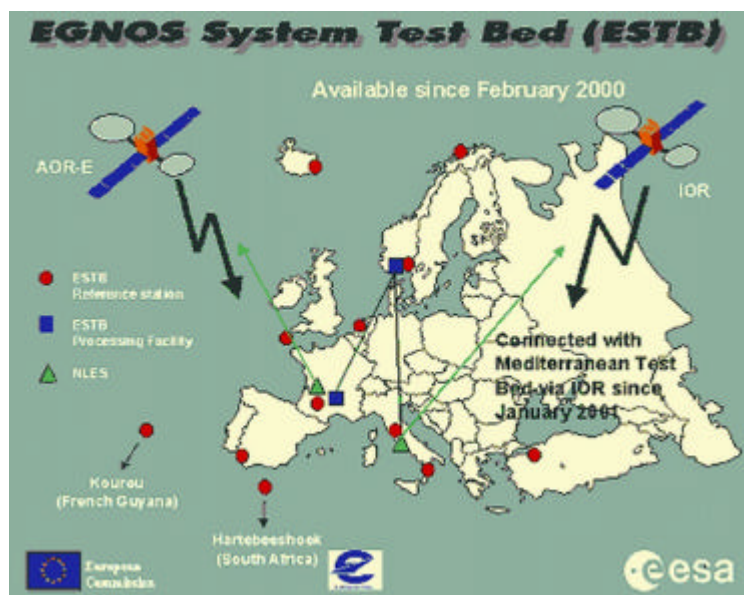


Figura 9: Diseño del sistema europeo EGNOS en su fase de prueba. Fuente: Dale, 2002.

El modo de operación “WAAS” provee una exactitud de aproximadamente 7 metros en posición vertical y horizontal a los receptores del sistema GPS (Yeazel, Jack. 2001) y mejora la disponibilidad del sistema mediante el uso de satélites de comunicación geoestacionarios equipados con servicios de navegación. Otras fuentes mencionan un error de ± 2 metros en elevación y 3 metros en planimetría para los Estados Unidos de América o en un área donde existe información sobre corrección ionosférica (Claborne, Christian, 2001; <http://www.faa.gov/apa/pr/>). Para el año 2001 se estaban utilizando dos satélites de comunicaciones geoestacionarios Inmarsat IIIs (POR, Pacific Ocean Region y AOR-W, Atlantic Ocean Region-West) para proveer el servicio WAAS (Fig.10).

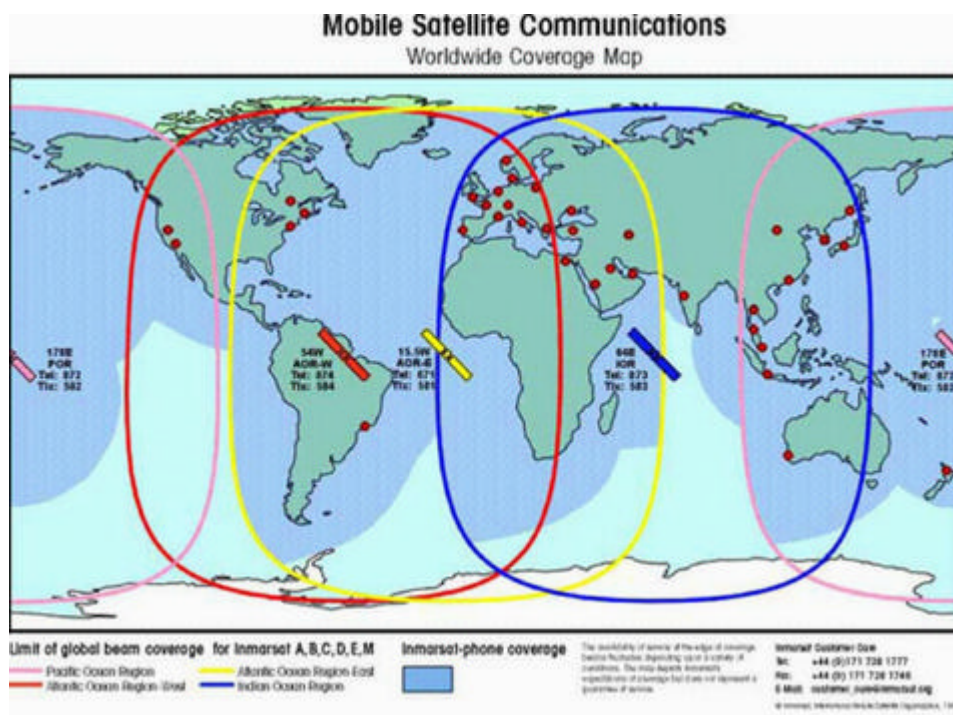


Figura 10: Ubicación de los satélites Inmarsat IIIs y sus respectivas áreas de cobertura. En Costa Rica y el resto de Centroamérica se recibe la señal del satélite AOR-W ubicado en la costa este de Brazil e identificado como el satélite No. 35 en un receptor Garmin.

Los nuevos receptores Garmin (Ej. etrex: Venture, Legend, y Vista; GPSMap76 y GPS76; GPSIV) pueden recibir señales de 19 satélites WAAS/EGNOS/MSAS; los cuales corresponden a los números 33 a 51 del receptor. Sin embargo en la actualidad solo existen dos satélites en operación. En la pantalla de satélites de su receptor usted puede distinguir los satélites WAAS porque aparecen con un identificador (ID) en la parte inferior y además a diferencia de los satélites de GPS no cambian de posición en la pantalla. Además, observará primero la letra D bajo los satélites WAAS y luego bajo aquellos satélites GPS para los cuales el receptor está recibiendo información de corrección diferencial. El almanaque WAAS no forma parte de la información que posee el receptor cuando usted lo compra y por tanto cada usuario(a) debe adquirirlo y cargarlo al receptor. En algunos casos este es un proceso sencillo y rápido en otros puede ser tedioso y tomar hasta varios días. En el caso de Centroamérica se tiene acceso al satélite 35 (AOR-W), ubicado a Lat 0 y Lon 54W, sobre la costa este de Brazil.

Los receptores Garmin utilizan uno o dos de sus 12 canales para registrar los satélites WAAS y cuando estos se encuentran disponibles, el receptor los utiliza para determinar la posición; por tanto la corrección diferencial es en tiempo real. A continuación se listan los números de identificación de WAAS y EGNOS en los satélites Inmarsat y su correspondiente número en los receptores Garmin.

Satélite Inmarsat	Pseudo random ruido (PRN)	ID del satélite en receptor Garmin
AOR-E	120	33
AOR-W	122	35
IOR	131	44
POR	134	47

Los siguientes identificadores se han asignado al sistema MSAS:

Satélite Inmarsat	Pseudo random ruido (PRN)	ID del satélite en receptor Garmin
MTSAT-1	129	42
MTSAT-2	137	50

Si usted desea conocer la elevación y rumbo de los satélites puede visitar los siguiente sitios web:

Nombre **Series** **Ubicación**
AOR-W **3F4** **Brazil east coast** (Costa este de Brazil)

<http://www.lyngsat.com/tracker/inmar3f4.shtml>

AOR-E **3F2** **West of Africa** (Africa occidental)

<http://www.lyngsat.com/tracker/inmar3f2.shtml>

IOR **2F3 and/or 3F1** **Indian Ocean** (Océano Indico)

<http://www.lyngsat.com/tracker/inmar3f1.shtml>

POR **3F3 and/or 2F1** **Pacific Ocean** (Océano Pacífico)

<http://www.lyngsat.com/tracker/inmar3f3.shtml>

¿Cómo funciona WASS?

El modo de operación WASS es similar al modo de operación diferencial basado en una estación base que transmite señales de corrección al receptor móvil; con la diferencia que opera desde un satélite Geoestacionario y no desde la superficie de la Tierra y además no envía un factor de corrección para las lecturas de pseudo distancia; sino que para cada una de las fuentes de error (distorsión ionosférica, error en los relojes atómicos y errores en las efemérides de los satélites). De estas fuentes de error, el retardo en la velocidad de la señal ocasionada por la *ionosfera* es el más importante.

Otra fuente importante de errores es la *troposfera*; sin embargo el sistema WAAS no puede enviar correcciones para esta fuente de error por depender del lugar donde se encuentra el georeceptor; sin embargo sí lo remueve en los cálculos de correcciones, de tal forma que el receptor pueda aplicar la corrección basado en su propio modelo atmosférico. La corrección de errores para

cada reloj atómico se hace cada minuto en tanto que para las efemérides y la ionosfera se hace cada dos minutos. La corrección ionosférica no es específica para cada satélite sino más bien para una zona o cuadrícula creada por la estación maestra o central a partir de la información suministrada por las estaciones de referencia. El planeta ha sido dividido en 9 bandas, las cuales a su vez contienen 201 puntos cada una, con excepción de la última que contiene 200 (Fig. 11). El receptor en la Tierra recibe información sobre la ubicación de esta cuadrícula y la utiliza para estimar el valor de corrección ionosférica que debe aplicar. Una vez que el receptor ha ubicado su posición selecciona los cuatro puntos más cercanos (aunque puede operar con tres) y luego interpola el valor correspondiente a la corrección ionosférica basado en su distancia relativa a dichos puntos. Algunos de los receptores modernos utilizarán aún la información de un punto siempre y cuando este se encuentre “cerca” del receptor móvil.

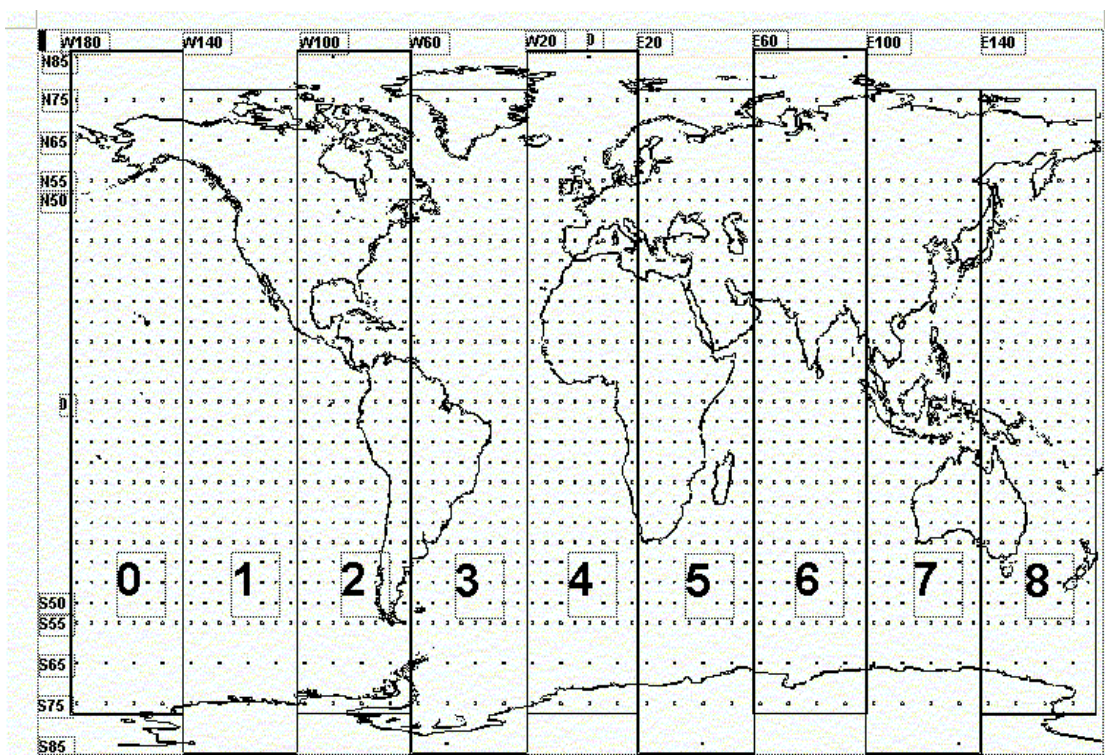


Figura 11: Cuadrícula utilizada por sistema central WASS para determinar correcciones ionosféricas. Fuente Dale, 2002.

La corrección ionosférica transmitida por el sistema WAAS es más exacta que el modelo ionosférico utilizado por los georeceptores. Además, el modo de operación WAAS es en general más exacto que el basado en la transmisión de señales de radio desde estaciones en tierra porque no sufre del efecto de *decorrelación espacial*, el cual consiste en la degradación de la corrección debido a la separación entre las estaciones base o de referencia. La información sobre el estado de la ionosfera así como las otras correcciones son transmitidas constantemente a los satélites Geoestacionarios para su retransmisión a los receptores de GPS y por tanto estos no tienen que realizar interpolaciones locales entre estaciones base.

La estación maestra también verifica la validez de los datos y comunica cualquier dato inválido al receptor móvil en un lapso de 6 segundos; esto asegura la integridad del sistema.

De los tres tipos de corrección mencionados previamente, solo la corrección ionosférica depende de la ubicación del receptor y de la existencia de estaciones terrestres que permitan construir el modelo de corrección ionosférico. Por tanto, un receptor ubicado fuera del área de cobertura del modelo ionosférico recibirá siempre la corrección para el reloj y la ubicación de los satélites.

¿Cómo configurar su receptor para recibir señales WAAS?

Para configurar su receptor en modo de operación WAAS proceda de la siguiente manera:

1. Ubíquese en un sitio con buena visibilidad en la dirección de los satélites Geoestacionarios. Si lo desea puede utilizar la ubicación de los satélites como puntos de destino y permitirle al receptor que le indique la dirección en que requiere orientar la antena de su receptor (cielo libre de obstrucciones). En el caso de Centroamérica se tiene acceso al satélites 35 (AOR-W); ubicado a Lat 0 y Lon 54W sobre la costa este de Brazil.
2. El receptor de GPS debe configurarse en modo de operación normal (***no** utilice modo de ahorro de baterías*).
3. Desde la pantalla del receptor, configúrelo para recibir la señal WAAS; observe que las últimas dos posiciones de la página de satélites del receptor son dedicados a los satélites WAAS. El receptor probará por todos los posibles números asignados a los satélites WAAS hasta que encuentre el ó los satélites visibles desde su posición. El color negro y la altura de las respectivas barras le indicarán la intensidad de la recepción.

Cuando el receptor no posee un almanaque mostrará los satélites en la parte superior de la pantalla de satélites. Durante el proceso de recolección de un almanaque se sugiere mantener el receptor fijo en un mismo punto (Por ejemplo sobre un poste o similar). Una vez que el receptor termina de cargar el almanaque, el color de los satélites se tornará negro y se moverá a la parte inferior derecha de la pantalla de satélites. El almanaque contiene información sobre la ubicación de los satélites Geoestacionarios WAAS, incluyendo información sobre su existencia (o inexistencia); hora y fecha en que fue colectado el almanaque y datos sobre corrección atmosférica. La información contenida en el almanaque es actualizada periódicamente por el receptor. El receptor puede requerir de 5 a 10 minutos para cargar un almanaque.

4. Los satélites que están operando bajo corrección diferencial mostrarán la letra D (por diferencial). Una vez que el receptor ha completado la fase de verificación y registro de los satélites WAAS le mostrará un mensaje indicando que está listo para navegar; así como el error esperado (EPE). Cuando el receptor se encuentra en operación actualizará la información recibida (Ej. correcciones al reloj atómico de los satélites, corrección ionosférica, corrección de efemérides, etc) en forma periódica (1 a 2 minutos).

5. Aun cuando el sistema mundial todavía se encuentra en su fase de prueba, es muy probable que los usuarios de GPS ubicados en América puedan tener acceso al sistema sin mayor dificultad.

Error esperado para receptores WAAS

Aun cuando el error del receptor dependerá de factores tales como ubicación, obstrucciones, presencia de rutas múltiples, hora del día y condiciones climáticas; las pruebas realizadas por usuarios utilizando el modo de operación WAAS indican que efectivamente este puede mejorar tanto la exactitud vertical como horizontal del receptor. Por ejemplo, se han obtenido errores planimétricos de 3 a 3.7m y de 6.0m en elevación 95% del tiempo siempre y cuando el receptor estuviera libre del efecto de rutas múltiples (<http://www.erols.com/dlwilson/gps.htm>).

A continuación se muestran los errores esperados bajo condiciones óptimas de trabajo (buena visibilidad y geometría de satélites, ausencia de neblina, sitio despejado). En la vida cotidiana estos errores pueden ser mayores debido a condiciones de visibilidad menos favorables del sitio.

Error	Valor (m)
Ionosfera	4.0
Reloj	2.1
Efemérides	2.1
Troposfera	0.7
Receptor	0.5
Rutas múltiples	1
Total	10.4

Fuente: www.celia.mehaffey.com/dale/dgps.htm

La ionosfera es la principal fuente de error en la actualidad, seguida por el reloj atómico del satélite y su posición en el espacio (efemérides); todos estos errores pueden eliminarse y/o minimizarse utilizando un receptores WAAS.

WAAS y los receptores Garmin

Los datos WAAS son enviados por los satélites Geoestacionarios en paquetes de 1 segundo (250bits) por cuanto el receptor móvil puede recibir dicha señal en cualquier momento (y perderla!!!). Una vez que el receptor ha detectado un satélite Geoestacionario le tomará unos segundos la descarga de información requerida para poder aplicar la corrección diferencial. El tiempo requerido por el receptor dependerá de los datos que el satélite esté enviando en ese momento. Normalmente, el receptor requerir de 10 a 12 segundos para recabar la información necesaria de los satélites GPS antes de iniciar el proceso de registro en modo diferencial. Una vez pasado esta fase, el proceso de operación en modo diferencial continuará por los próximos 2 minutos aun cuando se pierda el contacto con el satélite Geoestacionario (Dale, 2002). Dado que el sistema WAAS fue diseñado para apoyar la navegación aérea, sus especificaciones no cubren esta condición de trabajo y por tanto el usuario(a) debe monitorear constantemente el comportamiento de su

receptor. Una vez que las efemérides de los satélites Geoestacionarios son recibidas por el receptor, este las puede utilizar como otro satélite de la constelación GPS para determinar su posición. Sin embargo también puede utilizar el satélite solo como un transmisor de la información requerida para el aplicar la corrección diferencial. Cuando el receptor tiene activado el modo de operación WAAS, tratará de utilizar los satélites con corrección diferencial en lugar del modo de operación regular (no diferencial). Bajo circunstancias muy especiales la geometría de los satélites con corrección diferencial puede ser muy pobre y por tanto el error de ubicación puede ser mayor que bajo el modo de operación no diferencial. Sin embargo esto es poco factible que suceda ya que el satélite Geoestacionario radiará correcciones solo para aquellos satélites que se encuentran a un ángulo superior a 5 grados.

Algunos sitios de interés sobre el tema de corrección diferencial satelital son:

<http://waas.stanford.edu/~www/rfuller/iongps98/sld001.htm>
<http://www.sciencenet.org.uk/slup/CuttingEdge/Mar00/navigation.html>
<http://www.avweb.com/articles/satnav.html>
<http://www.faa.gov/apa/pr/pr.cfm?id=605>
<http://www.gpsinformation.net/exe/waas-comp.html>
<http://www.garmin.com>
<http://www.gpsinformation.net/exe/waas.html>
<http://www.gpsinformation.net/exe/waas-comp.html>
<http://www.raytheonands.com/waas/>
[FAA Completes Successful WAAS Flight Trials in the Republic of Chile](#)
[IEEE Proceedings, January, 1999, Vol 87, #1](#)
<http://raytheonands.com/waas/>
[FAA web site \(www.gps.faa.gov/programs/waas\)](#)

Medidas de precisión proveídas por el receptor

A continuación se describen las estimaciones de precisión que le puede brindar su receptor manual del SPG. Se recomienda que usted lee el manual del receptor para determinar cuáles de las medidas que se describen a continuación son suministradas por su receptor.

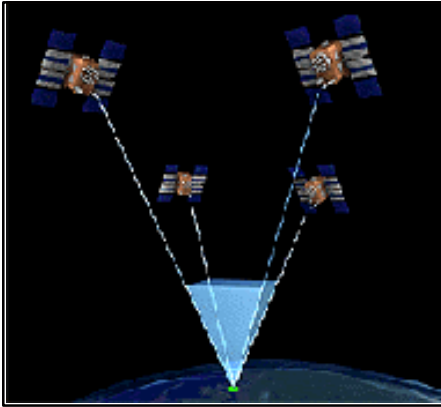
Dilución de la precisión (DOP)

Esta es una medida proveída por el receptor del SPG e indica la calidad que el usuario puede esperar en la ubicación del punto. Esta medida se basa exclusivamente en la geometría de la constelación de satélites utilizada por el receptor para determinar la posición del punto y por lo tanto puede determinarse sin realizar lecturas de pseudo distancia. La dilución de precisión puede expresarse a través de varios componentes:

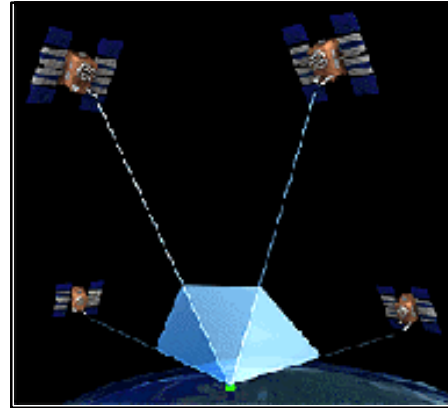
Dilución de precisión geométrica (GDOP)

La dilución de precisión geométrica indica el efecto de la geometría de los satélites en el error de posicionamiento. El GDOP puede interpretarse como la razón entre el error de posicionamiento y el error de medición de distancia al satélite. Si los 4 satélites requeridos para determinar la posición de un punto forman un tetraedro, conforme aumenta el volumen del tetraedro se reducirá el valor del

GDOP. Esto explica porqué mejora la calidad de posición conforme aumenta el número de satélites (a mayor número de satélites mayor volumen del tetraedro y por ende menor valor del GDOP).



Mala geometría



Buena geometría

Dilución de precisión en posicionamiento (PDOP).

Este valor integra el error esperado tanto en posición en latitud como en latitud y en elevación.

Dilución de precisión en tiempo (TDOP)

Este valor mide el error asociado a la lectura de tiempo

Dilución de precisión horizontal (HDOP)

Este valor mide el error asociado a la posición en X y Y (2D).

Dilución de precisión vertical (VDOP)

Este valor mide el error asociado a la lectura en elevación.

El usuario del receptor del SPG debe utilizar las diferentes medidas de *dilución de precisión del punto* (DOP) como un indicador de la calidad esperada en el posicionamiento del punto y no como una medida exacta del error asociado a dicha posición. Las estimaciones de error basadas en la geometría de la constelación satelital pueden ser poco confiables por las siguientes razones:

- ▼▼ Las observaciones de pseudo distancias pueden contener valores extremos, los cuales no serían contabilizados en la estimación del DOP.
- ▼▼ Los satélites con baja elevación pueden mejorar la geometría de la constelación; sin embargo las lecturas de distancia realizadas a partir de dichos satélites tendrán mayor error atmosférico; los cuales resultarían en posiciones poco exactas.
- ▼▼ En algunas publicaciones previas a mayo del 2000 se menciona el error asociado a la disponibilidad selectiva (SA); sin embargo a partir de la media noche del 1 de mayo del 2000 dicho condición fue eliminada.

Evaluación de la precisión y exactitud en posicionamiento

Antes de proceder a explicar las medidas de precisión es importante que el lector distinga la diferencia que existe entre *precisión* y *exactitud*. Con frecuencia dichos términos se utilizan como sinónimos; sin embargo no siempre esta interpretación es correcta. La exactitud es una medida del *error absoluto* del receptor en tanto que la precisión es una medida del *error relativo* del receptor. Dado que el promedio de las lecturas obtenidas con el receptor sea igual al valor real del punto que se mide entonces ambos términos serían iguales. Dado que esto no es cierto en la mayoría de las aplicaciones del SPG, se recomienda que el lector utilice los términos acorde a su significado.

Evaluación de la precisión

La medida más utilizada para evaluar la precisión de la ubicación realizada con un receptor de SPG es utilizando la *probabilidad de error circular* (CEP, por sus siglas en Inglés) y estimadores estadísticos paramétricas tales como la desviación estándar (valores sigma, σ).

Probabilidad de error circular (CEP)

Esta medida de precisión se define como el radio de un círculo en el cual se encontrará el 50% de los valores registrados por el receptor (Fig. 12). Por ejemplo, un valor de CEP de 25 metros indica que de 100 lecturas realizadas con el receptor para el mismo punto solo 50 se encontrarían en un radio igual o inferior a 25m. Dado que este nivel de certeza en la posición de un punto es poco útil para la mayoría de los usuarios(as) del Sistema de Posicionamiento Global, dicha medida se ha transformado en R95 o CEP95; la cual indica que al menos un 95% de las lecturas realizadas con el receptor estarán dentro del radio especificado. Para obtener el valor asociado con R95 obtenga una muestra de entre 100 y 200 lecturas para el mismo punto y luego obtenga el promedio para dichas lecturas, luego trace un círculo centrado en el promedio de tal forma que contenga el 95% de las observaciones. Un método alternativo de trabajo es realizar el mismo ejercicio pero para un punto de *posición conocida*; en este caso se evaluaría el **error** en posición. La desventaja de este método es que a menos que se conozca la función de densidad de la distribución de errores para el receptor no se puede hacer ninguna afirmación sobre el 5% restante de los puntos. Sin embargo, dado la tecnología utilizada en los receptores actuales es probable que las lecturas sean bastante consistentes y por lo tanto no se esperaría obtener valores extremos.

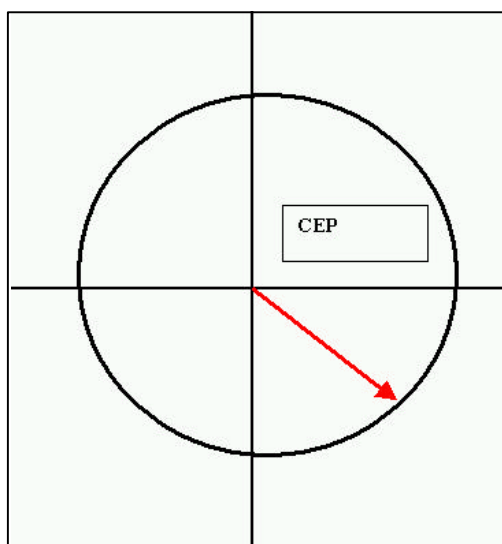


Figura 12: Probabilidad de error circular. El 50% de las observaciones se encuentran en el área indicada por el círculo.

La extensión DNR_garmin.avx permite calcular CEPs para 50, 90, 95 y 98% de confianza www.dnr.state.mn.us; ver Fallas, 2002. "MN DNR Garmin" para mayores detalles sobre la extensión.

Desviación estándar de la posición horizontal (DEPH)

La desviación estándar de un set de datos es una medida de la precisión o dispersión de las observaciones con respecto al promedio del set. Por ejemplo, un conjunto de datos con valores muy disímiles con respecto al promedio tendrán una desviación estándar grande (coeficiente de variación alto); en tanto que un set de datos con valores muy similares al promedio tendrán una desviación estándar pequeña (coeficiente de variación bajo). En este caso los cálculos parten del supuesto que los datos tienen una distribución normal. Bajo este supuesto se pueden hacer las siguientes afirmaciones (Fig. 13):

- ▼ El 68.3% de las observaciones estarán en el ámbito $\pm 1 \sigma$ con respecto al promedio
- ▼ El 95.4% de las observaciones estarán en el ámbito $\pm 2 \sigma$ con respecto al promedio
- ▼ El 99.7 % de las observaciones estarán en el ámbito $\pm 3 \sigma$ con respecto al promedio
- ▼ Casi el 100% de las observaciones estarán en el ámbito $\pm 4 \sigma$ con respecto al promedio

Por ejemplo, para un set de 100 lecturas de SPG, usted puede calcular la variabilidad en latitud (Y) y longitud (X) de sus lecturas y luego determinar el grado de dispersión (y por ende la precisión) de su localización en X y Y.

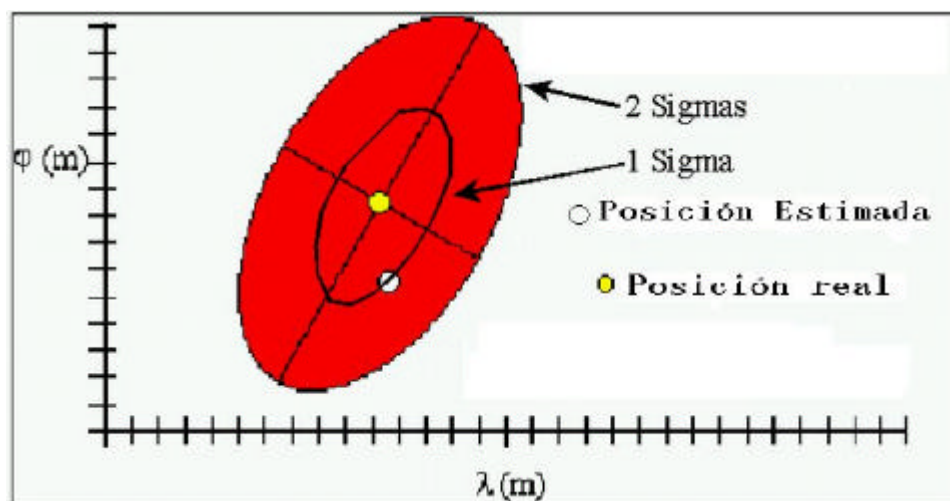


Figura 13: Error de posicionamiento expresado como una elipse.

El razonamiento anterior puede extenderse a la precisión con que se estima la ubicación del punto; a este valor se le denomina *Desviación estándar de la posición horizontal* (DEPH) y es igual a la raíz cuadrada de la suma de la varianza en longitud (Eje X) mas la varianza en latitud (Eje Y).

$$\text{DEPH} = (\text{Varianza en X} + \text{Varianza en Y})^{0.5}$$

El valor de DEPH será siempre positivo y sus unidades corresponden a las unidades del sistema de referencia en uso (Ej. grados decimales, metros, etc.).

El concepto puede extenderse a tres dimensiones cuando se dispone de lecturas de elevación. En este caso se denomina al estimador Sigma 3D y su valor es igual a:

$$DEP3D = (\text{Varianza en X} + \text{Varianza en Y} + \text{Varianza H})^{0.5}$$

La desventaja de las medidas de calidad de los datos anteriores es que no consideran el efecto de observaciones extremas y por lo tanto es recomendable graficar previamente los datos para detectar posibles lecturas no representativas del set de datos. También es recomendable realizar una prueba de hipótesis para detectar valores extremos utilizando los residuos normalizados y un alfa de 99%. Si usted desea probar por la normalidad de los datos utilice la prueba de Shapiro-Wilk, conocida como estadístico W.

Evaluación de la Exactitud

El concepto de exactitud requiere que se conozca la **posición real** del punto bajo evaluación. La exactitud en posicionamiento puede estimarse como un error horizontal ó como un error radial. Ambos valores serán diferentes en la mayoría de los casos y por ende el lector debe seleccionar aquel que mejor responda a sus criterios de calidad.

Error horizontal en X y Y

El error horizontal se determina restando los valores obtenidos para “X” y “Y” de los respectivos valores conocidos (Ej. Obtenidos de un mapa ó de lecturas de un geoposicionador de mayor exactitud) (Fig. 14).

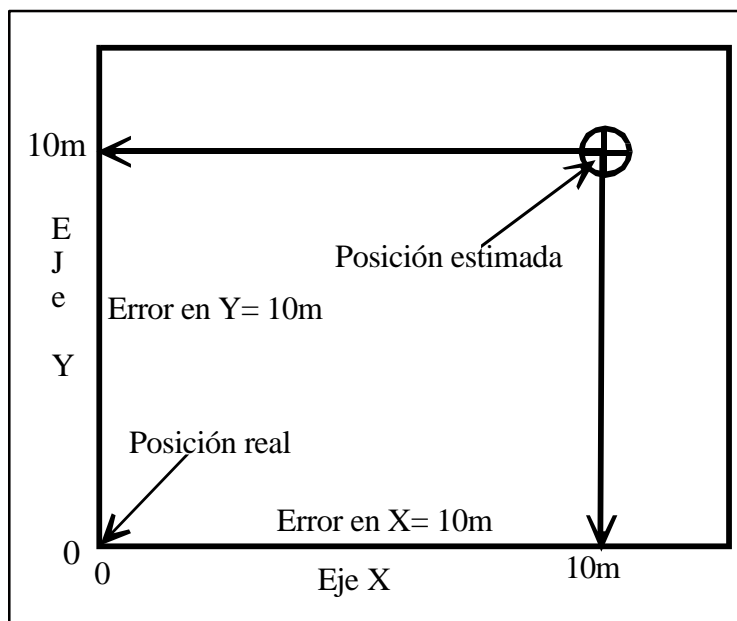


Figura 14: Estimación del error horizontal en “X” y “Y”.

El error en posicionamiento es igual a:

$$\text{Error X (m): } E_x = X_{\text{real}} - X_{\text{estimado con el geoposicionador}}$$

$$\text{Error Y (m): } E_y = Y_{\text{real}} - Y_{\text{estimado con el geoposicionador}}$$

Si usted dispone de “n” puntos de muestreo puede estimar la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC) para su set de datos. Para esto, simplemente eleve al cuadrado cada error, obtenga el promedio y luego extraígale la raíz cuadrada. El intervalo de confianza para el error en “X” es igual a:

IC: $t_{1-\alpha/2, n-1} * REMC_X / (n)^{0.5}$ en donde 1- α es el nivel de confianza y n-1 los grados de libertad.
 $REMC_X$ (Error medio de posicionamiento en “X”) = $[\text{suma } (E_x)^2 / n]^{0.5}$

El intervalo de confianza para el error en “Y” es igual a:

IC: $t_{1-\alpha/2, n-1} * REMC_Y / (n)^{0.5}$ en donde 1- α es el nivel de confianza y n-1 los grados de libertad.
 $REMC_Y$ (Error medio de posicionamiento en “Y”) = $[\text{suma } (E_y)^2 / n]^{0.5}$

Error radial

El error radial es el resultado de combinar el error de posicionamiento tanto en la dirección horizontal (Eje X) como en la vertical (Eje Y). El error en posicionamiento es igual a:

$$\text{Error radial } (E_{xy}) = [(\text{error en } x)^2 + (\text{error en } y)^2]^{0.5}$$

Por ejemplo, un punto con un error de 10m tanto en X como en Y tendrá un error radial de 14.1m (Fig. 15). El desplazamiento entre los puntos puede medirse utilizando el programa ArcView GIS o cualquier otro programa.

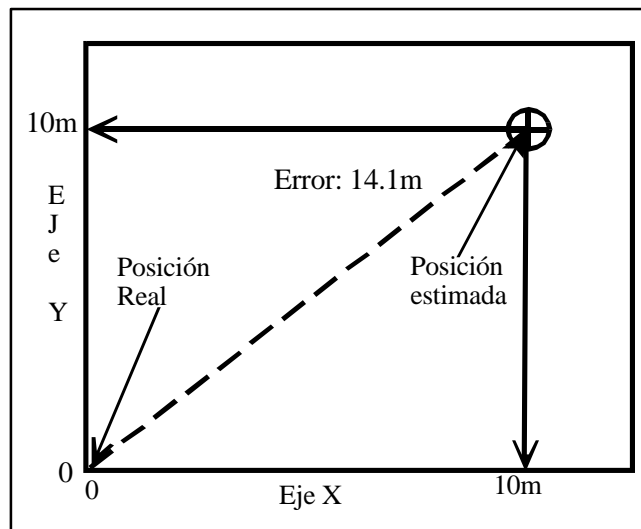


Figura 15 : Estimación del error radial.

La medida de error denominada *dos veces la raíz cuadrada del error medio cuadrático de la distancia* (2drms) es la que se utiliza con mayor frecuencia en la actualidad e indica que el error en posicionamiento es igual a dos veces la *raíz cuadrada del error radial medio cuadrático*. En este caso el error se define como la distancia entre la *posición real* del punto y la posición estimada con el receptor (error radial). Su valor puede estimarse multiplicando el valor de la *dilución de precisión horizontal* (HDOP, por sus siglas en Inglés) suministrada por el receptor por la desviación estándar

de las posiciones registradas por el receptor. La desventaja de esta medida es que no tiene una probabilidad constante asociada a la estimación. La probabilidad asociada a la estimación del error depende del grado de elipticidad de la distribución de los errores; la cual a su vez depende de la geometría particular de los satélites utilizados. Si se asume que los errores en posicionamiento tienen una distribución normal dicho error tendrá una probabilidad de 95.4% a 98.2%.

Si usted dispone de “n” puntos de muestreo puede estimar la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC) para su set de datos. Para esto, simplemente eleve al cuadrado cada error radial, obtenga el promedio y luego extraíga la raíz cuadrada. El intervalo de confianza para el error radial es igual a:

$$\text{REMC} = \left[\frac{\sum (E_{xy})^2}{n} \right]^{0.5}$$

en donde: E_{xy} representa el error de posicionamiento radial del punto y “n” el número de puntos medidos.

A continuación se ilustra el cálculo del error radial y de la raíz del error medio cuadrático (REMC) para 5 puntos.

Cuadro 1: Cálculo del error radial (E_{xy}) y de la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
X	X	Dif.		Y	Y	Dif.		(dif en x) ² +	Error
(muestra)	(real)	en X	(dif en x) ²	(muestra)	(real)	en Y	(dif en y) ²	(dif en y) ²	Posición (X,Y) ¹
512	510	2	4	490	487	3	9	13	3.6
250	248	2	4	350	352	-2	4	8	2.82
130	133	-3	9	160	163	-3	9	18	4.24
450	452	-2	4	290	289	1	1	5	2.23
640	644	-4	16	160	161	-1	1	17	4.12
Total								61	17.01
REMC ²								3.49	3.40
NSSDA ³								6.04	5.88

¹ Raíz cuadrada de $(\text{dif en } x)^2 + (\text{dif en } y)^2$; esto representa el error radial

² REMC: raíz cuadrada del error medio cuadrático. **Nota:** La diferencia entre 3.49m y 3.40m se debe al redondeo. Los dos valores deben ser iguales.

³ Estándar recomendado por “Federal Geographic Data Committee, USA” (1998) cuando el error en X es igual al error en Y. $\text{REMC} \cdot 1.7305$ ($3.49 \cdot 1.7305 = 6.04$ m)

Nota: Si lo desea puede utilizar el archivo adjunto *error_horizontal.xls* para el cálculo del REMC.

El intervalo de confianza para el error es igual a:

IC: $t_{1-\gamma/2, n-1} \cdot \text{REMC}/(n)^{0.5}$ en donde $1-\gamma$ es el nivel de confianza y $n-1$ los grados de libertad.

Nuevos receptores manuales: mejor precisión y exactitud

Los avances logrados en la tecnología que permite crear los receptores manuales de SPG ha avanzado sustancialmente en los últimos 5 años. Los nuevos aparatos brindan mejor precisión y mayor disponibilidad y confiabilidad a sus usuarios. Las innovaciones han estado orientadas a mitigar los errores debido a las rutas múltiples, la estabilidad de la antena y la confiabilidad de los datos bajo condiciones de recepción adversa tales como obstrucciones parciales debido a copas de los árboles; interferencia de otros sistemas de comunicación tales como radio y televisión; interferencia por líneas de transmisión y transformadores; altos niveles de actividad en la ionosfera que dificultan el seguimiento de la señal L2; movimientos bruscos del receptor y pérdida momentánea en la recepción. Cada compañía que manufactura receptores de SPG tienen su propia tecnología y forma de mitigar dichos problemas y por lo tanto se remite al lector a la sección de especificaciones técnicas de su manual para determinar las características técnicas de su receptor.

Rutas múltiples (reflejo)

El error ocasionado por las rutas múltiples pueden mitigarse mediante dos técnicas: proceso de la señal y anillos de rechazo de rutas múltiples.

Proceso de la señal

En este método de mitigación la señal es analizada para separar la señal directa de la indirecta(s). Este método equivale a separar la señal principal de la señal correspondiente a un eco cuando se transmite un sonido en un cañón. El método es eficiente cuando la diferencia entre la señal principal y el eco es evidente; sin embargo es poco útil cuando la diferencia es poca. En este segundo caso, al remover parte de la señal correspondiente a la ruta múltiple (eco) también se elimina parte de la señal directa y por lo tanto aumenta el ruido asociado a la recepción. Este técnica de mitigación es apropiada cuando la señal reflejada proviene de objetos ubicados a una distancia superior a 10m de la antena del receptor.

Anillos de rechazo de rutas múltiples

Esta técnica de mitigación actúa sobre aquellas señales que provienen de objetos ubicados por debajo de la antena del receptor. Normalmente la distancia entre estas señales y la antena es inferior a 10m y por tanto este error no puede ser corregido por el método de *proceso de la señal*. De esta manera se puede mitigar el efecto de rutas múltiples cercanas y lejanas. La eficiencia en la supresión de rutas múltiples está en función del ángulo de elevación; la supresión máxima se logra a ángulos cercanos al zenit y la mínima a ángulos cercanos al horizonte. Normalmente, el método de supresión funciona para una frecuencia (L1 ó L2).

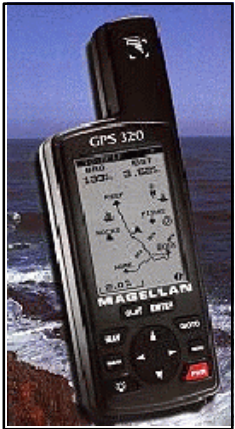
Elección de un receptor manual

En la actualidad existe una variada gama de receptores de SPG; sin embargo los mismos pueden clasificarse de acuerdo a su precio, error y área de aplicación. A continuación se presentan las características de algunos receptores manuales con un costo inferior a los US\$300 y cuyo uso es navegación en mar, tierra y aire. Aun cuando dichos receptores no están diseñados para trabajos cartográficos o de topografía, la mayoría ofrecen errores entre 10 y 15 m en modo no diferencial y por lo tanto serían apropiados para realizar trabajos a escala 1:25.000 y 1:50.000.



Navegación en la edad de piedra. Modelo agotado. Navegación mediante sextante. Modelo agotado.

A continuación se muestran, a manera de ejemplo, algunos receptores manuales de bajo costo; si usted desea conocer los precios y modelos actuales se recomienda visitar alguno de los sitios web de las compañías que venden dicho equipo.

 <p>Garmin 12CX (US\$249.99)</p>	 <p>Garmin 12XL (\$199.99)</p>	 <p>Magellan 320</p>
--	--	--

Especificaciones técnicas del Garmin 12XL (US\$199.99)

Receiver:	12 channels
Differential ready	(DGPS): Yes
Acquisition time	(cold): 45 seconds
Acquisition time	(warm): 15 seconds
Update rate: 1 per	second, continuous
Position accuracy:	49 feet RMS
Velocity accuracy:	0.1 knots RMS
Dynamics:	6 Gs
Water resistance rating: IPX7: Protected for 30 minutes at a depth of 3.3 feet	
Operating temperature range: 5 to 124 F	

Interfaces:	NMEA 0183, RTCM 104 DGPS correction
Antenna:	Internal patch
Battery life:	24 hours
Power consumption:	10-40 volts
Waypoints:	500
Track log:	1024 tracklog points
Track back:	Yes
Route log:	20 routes with 30 waypoints
Points of interest:	No
Compass screen:	No
Moving-map display:	No
Map storage:	No
Data storage:	Waypoints only
Sun/moon rise/set/phase:	Yes
Display size:	2.2 by 1.5 inches
Display resolution:	64 x 100 pixels
Display color:	B/W
Backlight:	Yes
Battery requirements:	4 AA batteries
Power cable:	Optional
Carrying case:	Yes
Vehicle mounting bracket:	Optional
PC cable:	Optional
Software:	Built-in North America City Point Database; South America, Europe, Africa, Asia, South Pacific databases available; optional map software available
Data card:	No
Width:	2.1 inches
Depth:	1.2 inches
Height:	5.8 inches
Weight:	9.5 ounces
Warranty, parts:	1 year
Warranty, labor:	1 year

Especificaciones técnicas del Garmin GPS III Plus \$280

Receiver:	12 channels
Differential ready	(DGPS): Yes
Acquisition time (cold):	45 seconds
Acquisition time (warm):	15 seconds
Update rate: 1 per	second, continuous
Position accuracy:	49 feet RMS
Velocity accuracy:	0.1 knots RMS steady state
Dynamics:	6 Gs
Water resistance rating:	IPX7: Protected for 30 minutes at a depth of 3.3 feet
Operating temperature range:	5 to 158 F
Interfaces:	NMEA 0183, RTCM 104 DGPS corrections
Antenna:	Detachable with standard BNC connector
Battery life:	36 hours
Power consumption:	0.75 watts
Waypoints:	500
Track log:	1900 tracklog points
Track back:	Yes
Route log:	20 routes with 30 waypoints each
Points of interest:	No
Compass screen:	Yes
Moving-map display:	Yes
Map storage:	No
Data storage:	No
Sun/moon rise/set/phase:	No
Additional features:	Built-in base map of major roadways, highway exit information
Display size:	2.2 by 1.5 inches
Display resolution:	100 x 160 pixels
Display color:	4-level gray scale
Backlight:	Yes
Battery requirements:	4 AA batteries
Power cable:	No
Carrying case:	Sold separately, lanyard included
Vehicle mounting bracket:	Bracket sold separately, Velcro dashboard mount included
PC cable:	Included
Software:	MapSource CDs sold separately
Data card:	No
Width:	5 inches
Depth:	2.32 inches
Height:	1.62 inches
Weight:	9 ounces
Warranty, parts:	1 year
Warranty, labor:	1 year

Especificaciones técnicas del Magellan Colourtrak

Ships With	Carrying case, 4AA alkaline batteries, Wrist strap, User/Quick Reference guide
# of Waypoints	500 waypoints
# of Routes/Legs	20 routes with 30 legs fully reversible & editable
Position Coordinates	LAT/LON, UTM, OSGB, MGRS, TD's, Swiss, Swedish, Irish, Finnish, French, German, User Grid
Weight w/Battery	340.2gm
Dimensions (h x w x d)	16cm x 6.5cm x 3.5cm
Operating Temp. Range	-10deg to 60deg C
Data Input/Output	DGPS ready, RTCM 104(in)/NMEA 0183 (out) vers 1.5 & 2.1, Plus data upload & download w/optional PC kit
Alarm Support	Yes, Anchor, Arrival, Cross Track Error, Proximity
Battery Life	30 hours continuous use on 4AA alkaline, 10yr lithium back-up for memory
Display Type & Size (h x w)	Colour, Backlit display 128 x 64pixels, 7cm x 3.8cm
Unique Features	Large colour display, Multicoloured waypoint icons & track data, Built-in thermometer & altimeter, Internal/External Alarms, Backlit display & keypad, Course projection indicator.

La nueva tecnología de muñeca: el Casio Pathfinder NAVI (Reloj y receptor GPS en uno)

Este nuevo receptor miniatura de la compañía Casio le permite determinar la posición en latitud y longitud (grados, minutos y segundos) ó en coordenadas del sistema Universal Transversal de Mercator (UTM); así como el día y hora. Posee además otras cuatro pantallas en la cuales usted puede visualizar la siguiente información: recorrido, elevación, destino y puntos de referencia. El reloj-SPG le permite almacenar hasta un máximo de 200 puntos con su respectivo nombre y un máximo de 400 puntos de recorrido. El aparato incluye su propio software para la gestión de rutas y puntos de recorrido; también incluye un adaptador AC y un cable de interface serial. El "Pathfinder NAVI" utiliza una batería recargable de ion de litio que le provee energía para guardar los datos durante 40 días ó 3.5 horas de recepción en modo continuo (con lecturas a intervalos de 1 minuto), ó el registro de 140 lecturas individuales; ó 70 minutos de registro continuo con lecturas cada segundo. Este nuevo modelo tiene un 40% menos de volumen que el anterior y su peso es también un 50% menor.






El costo sugerido por el fabricante es de \$US499; sin embargo puede adquirirse en el mercado por US\$399 (www.thegpsstore.com). Las especificaciones técnicas del aparato son las siguientes:

- ▼▼ 12 canales paralelos, cargador de baterías.
- ▼▼ 5 pantallas para visualizar información por parte del usuario
- ▼▼ Resistente al agua hasta 50m
- ▼▼ Cable serial para comunicación con una computadora vía el software incluido con el receptor. El software le permite visualizar imágenes de mapas en formato BMP y JPEG.

El aparato almacena en su memoria EEPROM la información de los almanaques, la cual es utilizada conjuntamente con el código de las ciudades y la hora del día para determinar cuáles satélites están visibles; esto le permite al receptor generar una posición en 12 segundos.

Reptores GARMIN equipados con WAAS

	eTrex Venture	eTrex Legend	eTrex Vista	GPSMAP 76S	GPS V
Modelo					
Our Price	\$244.95CAD	\$334.95CAD	\$469.95CAD	\$609.95CAD	\$589.95CAD
Database or map	City Point Database (1)	Built-in basemap (3)	Built-in basemap (3)	Built-in basemap (3)	Built-in routable basemap (3)
Display pixels	160x288 17,454/sq in	160x288 17,454/sq in	160x288 17,454/sq in	180x240 12,273/sq in	256x160 12,412/sq in
Reversible Routes	20	20	20	50	20
Tracklog Main tracklog # saved logs # points/saved log	2048 10 250	2048 10 250	3000 10 250	5000 10 250	3000 10 250
Sensors	None	None	Electronic compass(4) Barometric altimeter(5)	Electronic compass(4) Barometric altimeter(5)	None
Ext. Antenna Hookup	No	No	No	Yes	Yes
Other features	Area (7) Geocaching icons	Area (7) Geocaching icons	Elevation profiling (6) Area (7) Geocaching icons	Elevation profiling (6) Area (7) Audible alarms (8) Position averaging	Area (7) Position averaging. Auto route calculation. Horiz / vert display Geocaching icons
MapSource compatibility	Load 1MB of data from the Points of Interest CD	Load 8MB of map detail from a variety of MapSource CDs	Load 24MB of map detail from a variety of MapSource CDs	Load 24MB of map detail from a variety of MapSource CDs	Load 19MB of map detail from a variety of MapSource CDs
WAAS enabled					
Accessories included	Lanyard, PC interface cable	Lanyard, PC interface cable	Lanyard, PC interface cable	Lanyard, PC interface cable	City Select CD-ROM with Unlock Code for one region, Auto Mount, 12 v Adapter, PC Int Cable

Observe que algunos receptores incluyen altímetros y brujulas; así como un conector para antena externa. Otros poseen más memoria para cargar mapas y otros pueden guardar más puntos (*track*).

Precisión en las lecturas de algunos receptores manuales

A continuación se ilustra el efecto de la Disponibilidad Selectiva (SA) y del receptor en la precisión de las lecturas realizadas con cuatro receptores manuales de GPS. El primer set de datos fue adquirido cuando SA estaba activo y corresponde a un receptor Trimble (Path Finder Plus), el segundo a un receptor Magellan Pro; el tercero a un Garmin III+ y el cuarto a un Garmin Etrex Vista. Los últimos tres sets de datos fueron adquiridos cuando SA estaba desactivada.

Receptor Path Finder Plus de Trimble

Los datos corresponden al periodo en que SA estuvo activada y por tanto la variabilidad o dispersión observado en los mismos es mayor a la esperada en el presente sin el efecto de SA. La primera gráfica corresponde a la dispersión en posición (Fig. 16), la segunda a la dispersión en longitud (Fig. 17), la tercera a la dispersión en latitud y la cuarta a la dispersión en elevación sobre el nivel medio del mar (Fig. 18). Las gráficas permiten hacer varias observaciones:

- ?? La dispersión de los datos indica que el error no es circular (igual en X que en Y) y que más bien la tendencia de la nube de puntos es similar a una elipse.
- ?? El error/dispersión en el sentido NE, SW es mayor que en el sentido NW, SE.
- ?? Existe un par de puntos extremos (ubicados fuera de la nube de puntos).
- ?? El sesgo en latitud fue inferior al promedio para los primeros 350 puntos y superior para el resto de los puntos.
- ?? Los valores de elevación mostraron saltos bruscos para las primeras 250 observaciones.

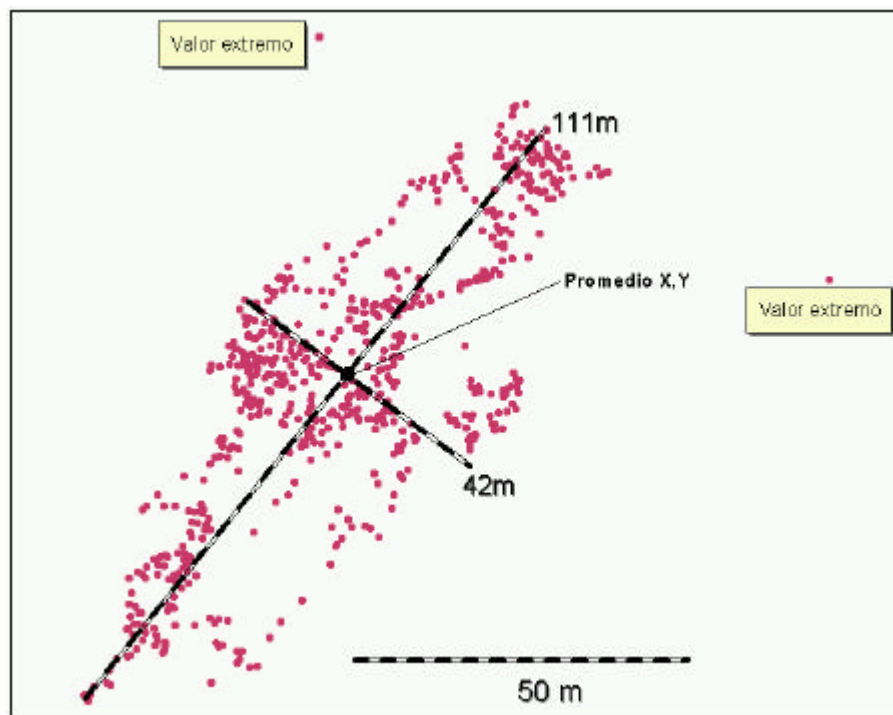


Figura 16: Variación en los registros de longitud (X) y latitud (Y) a lo largo de 16 minutos. Las lecturas fueron registradas aproximadamente cada segundo. Modelo Trimble PathFinder Plus. SA activa. 9 diciembre 1997. Hora: 2:27 pm a 2:43pm.

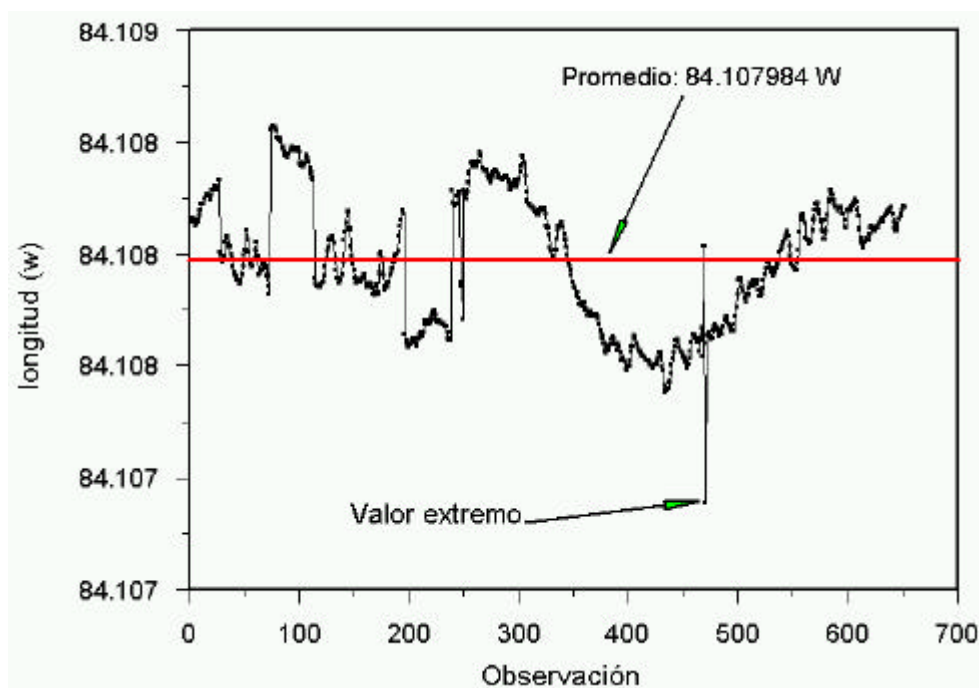


Figura 17: Variación en los registros de longitud (X) a lo largo de 16 minutos. Las lecturas fueron registradas aproximadamente cada segundo. Modelo Trimble PathFinder Plus. SA activa. 9 diciembre 1997. Hora: 2:27 pm a 2:43pm.

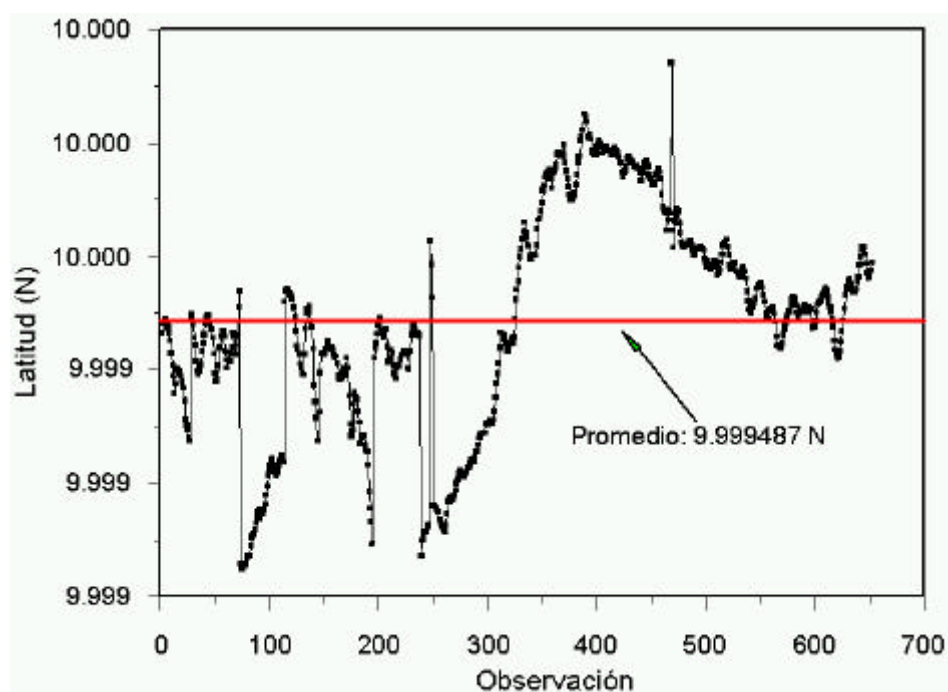


Figura 18: Variación en los registros de latitud (Y) a lo largo de 16 minutos. Las lecturas fueron registradas aproximadamente cada segundo. Modelo Trimble PathFinder Plus. SA activa. 9 diciembre 1997. Hora: 2:27 pm a 2:43pm.

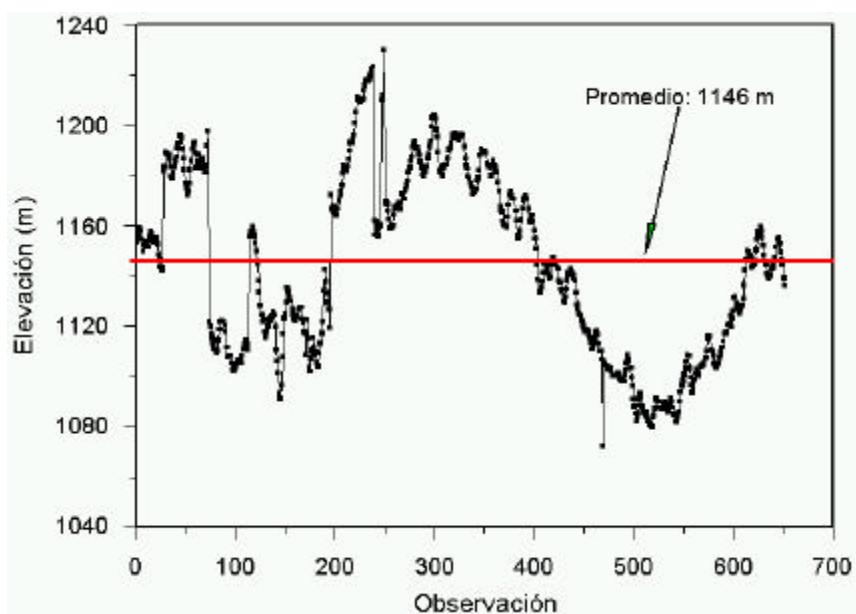


Figura 19: Variación en los registros de elevación (Z) a lo largo de 16 minutos. Las lecturas fueron registradas aproximadamente cada segundo. Modelo Trimble PathFinder Plus. SA activa. 9 diciembre 1997. Hora: 2:27 pm a 2:43pm.

La figura 20 muestra el cálculo del error circular probable (CEP) para el set de datos. El 50% de las observaciones se encuentran en un radio de 20.2m, el 90% en un radio de 44.9m, el 95% en un radio de 48.6m y el 98% en un radio de 53.1m. Los valores fueron calculados con la extensión *avgarmin.avx* (www.dnr.state.mn.us).

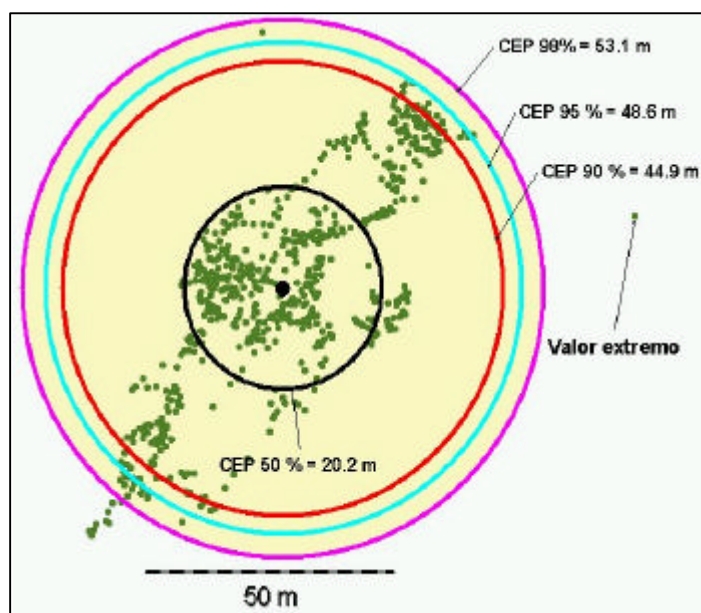


Figura 20: Cálculo del error circular probable para 651 lecturas realizadas desde un punto fijo con un receptor Trimble Path Finder Plus. SA activa. 9 diciembre 1997. Hora: 2:27 pm a 2:43pm.

La figura 21 muestra el cálculo de la elipse bivariada de probabilidad normal (Jennrich y Turner, 1969) con una confianza del 95% para el set de datos. Los valores fueron calculados con la extensión *Animal Movement.avx* (http://www.absc.usgs.gov/glba/gistools/animal_mvmt.htm). La gráfica muestra la distribución esperada de los puntos en un 95% del tiempo, dado que los mismos tengan una distribución normal bivariable. Es evidente en la gráfica que el error en el eje primario (NE-SW) es mayor que en el eje secundario (NW-SE) y que por tanto el cálculo del error circular no se ajusta a la dispersión mostrada por los datos.

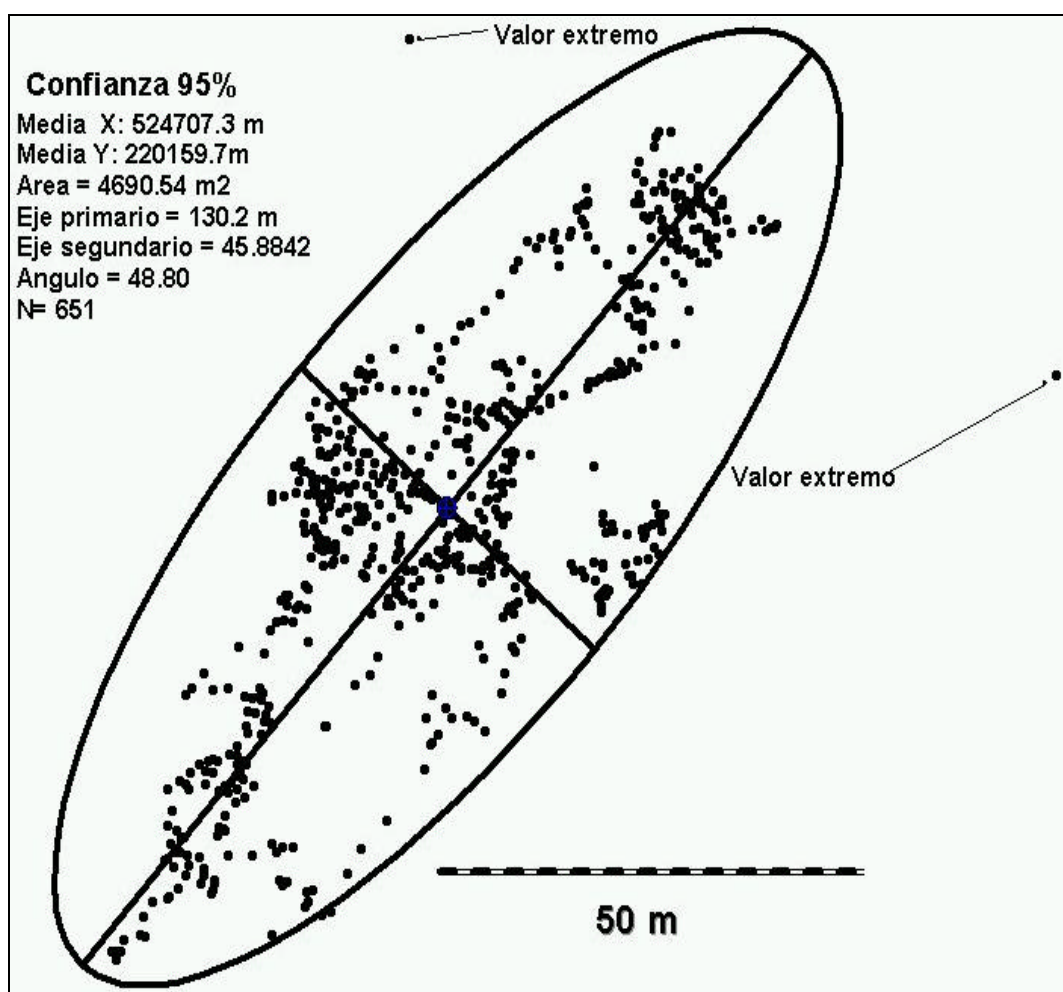


Figura 21: Elipse bivariada de probabilidad normal con una confianza del 95% para 651 lecturas realizadas desde un punto fijo con un receptor Trimble Path Finder Plus. SA activa. 9 diciembre 1997. Hora: 2:27 pm a 2:43pm.

Receptor Magellan Pro

La figura 22 corresponde a 193 lecturas registradas con un receptor Magellan Pro a campo abierto en mayo del 2001. Estos datos están exentos del efecto de SA y por tanto la dispersión observada es mínima comparada con los datos del receptor Trimble. Note que la mayoría de las lecturas se

encuentran en un radio inferior a 1 metro y que además la nube de puntos tiene una forma circular. En este caso el calculo del error circular sería apropiado.

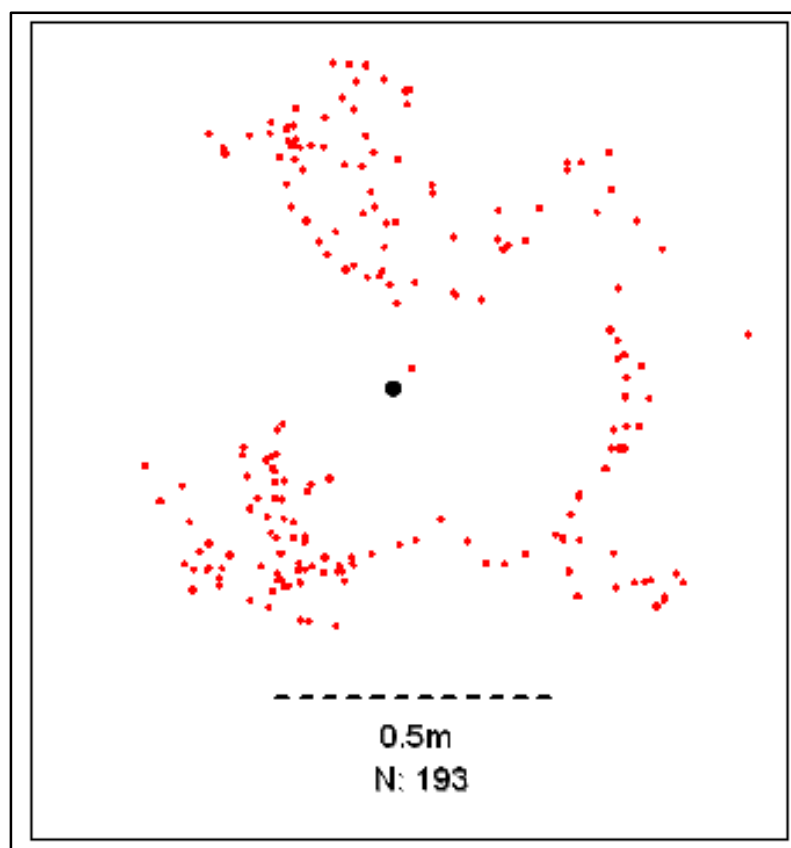


Figura 22: Variabilidad en latitud y longitud en los registros de un receptor Magellan Pro. Mayo 2001. Datos sin corrección diferencial.

Garmin III+

La figura 23 corresponde a 3808 lecturas realizadas a campo abierto con un receptor Garmin III+ en modo no diferencial el 7 de julio del 2002 a las 5pm. Estos datos se encuentran libres del efecto de SA y por tanto la dispersión observada es menor comparada con los datos del receptor Trimble. El 50% de las observaciones se encuentran en un radio de 6.2m, el 90% en un radio de 15.2m, el 95% en un radio de 19.7m y el 98% en un radio de 25.4m. Estos valores corresponden al error circular probable (CEP) y fueron calculados con la extensión *avgarmin.avx* (www.dnr.state.mn.us). El error citado por la compañía Garmin para el receptor es de 15 metros; por lo que corresponde aproximadamente a un CEP del 98% y le indica que de 100 puntos se espera que 98 se encuentren en un radio inferior o igual a 25.4m.

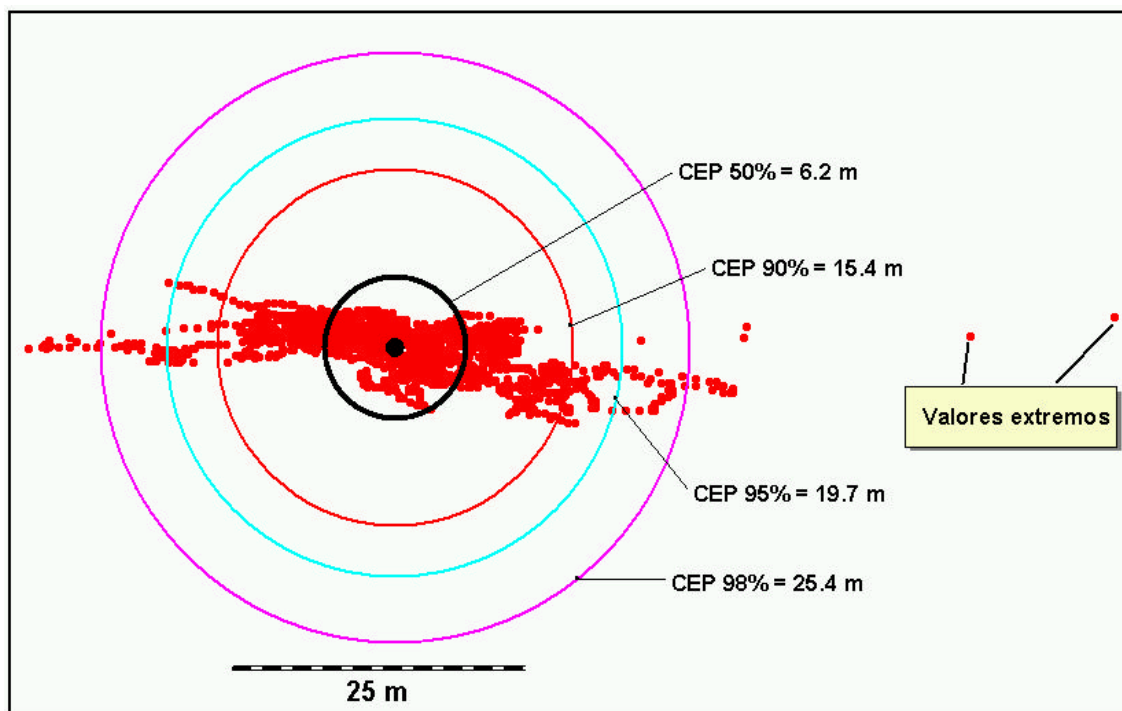


Figura 23: Variabilidad en latitud y longitud en los registros de un receptor GARmin III+. 7 julio 2002, 5pm. Datos sin corrección diferencial.

El cuadro 2 compara el área equivalente para niveles de confianza entre 50% y 98% para los datos obtenidos con el receptor Trimble Path Finder Plus y con el receptor Garmin III+. Aun cuando las lecturas no corresponden al mismo sitio, permiten evaluar tanto el efecto de la disponibilidad selectiva (SA) como del receptor en cuanto a la incertidumbre asociada a las lecturas. Aun cuando los receptores son de diferentes marcas y manufacturados en diferentes momentos (el Garmin es más reciente), es muy probable que la principal diferencia en el nivel de incertidumbre se deba al error introducido por Disponibilidad Selectiva (SA). Es de esperarse que los receptores más recientes que utilizan el código C/A puedan lograr una mayor exactitud y precisión en los registros de posición; sin embargo dicho valor estaría limitado a unos 10m en ausencia de SA.

Cuadro 2: Relación entre el área correspondiente a CEPs de 50%, 90%, 95% y 98% para dos sets de datos adquiridos con un receptor Trimble y con uno Garmin.

CEP	AREA m ²		
	Trimble Path Finder Plus ¹	Garmin III+ ²	Diferencia ³
50%	1281.90	120.80	10.6
90%	6333.50	745.10	8.5
95%	7420.33	1219.22	6.08
98%	8858.10	2026.83	4.37

¹ 9 diciembre 1997. Hora: 2:27 pm a 2:43pm. SA activa; datos sin corrección diferencial.

² 7 julio 2002, 5pm. SA inactiva; datos sin corrección diferencial.

³ Número de veces que es mayor el área estimada para el receptor Trimble Path Finder Plus

La figura 24 permite comparar el comportamiento de la precisión de receptor al realizar mediciones a las 7pm y 9pm del 7 de julio del 2002 y a las 9 am del 8 de julio del 2002. La diferencia en la ubicación media para la precisión excelente y moderada es de unos 4m; en tanto que entre la precisión baja y las otras dos es de unos 23m. La forma y tendencia de la nube de puntos es también diferente para los tres sets de datos. Para un CEP del 95% los registros con excelente precisión tienen un valor de 2.5 m; para los de moderada precisión 18.1 m y para los de muy baja precisión 36.7 m.

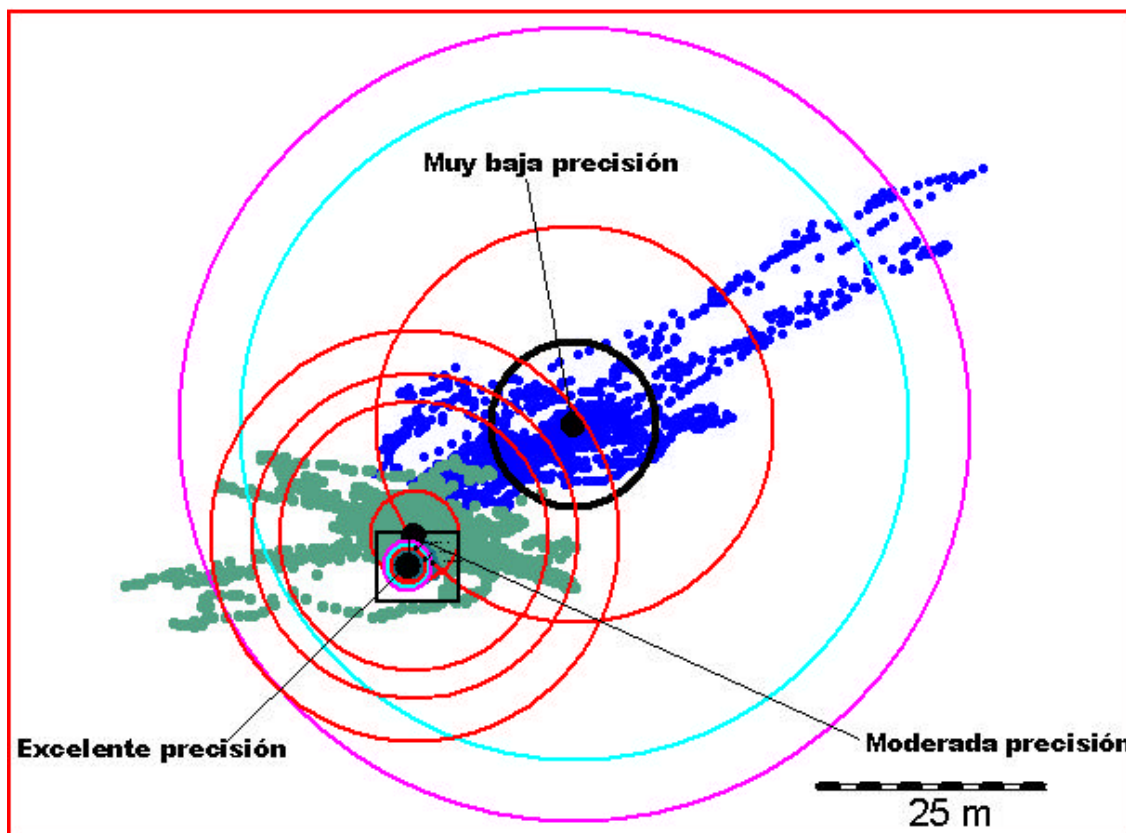


Figura 24: Comparación en la dispersión de puntos para lecturas realizadas a las 7pm y 9pm del 7 de julio del 2002 y a las 9am del 8 de julio del 2002. Sabanilla de Montes de Oca, San José. Cielo entre moderadamente nublado y despejado.

Garmin Etrex Vista

La figura 25 muestra la precisión del receptor Garmin Etrex Vista al realizar mediciones a las 8am del 9 de agosto y a las 2pm del 3 de setiembre del 2002 bajo condiciones de cielo despejado. Este receptor tiene la capacidad de recibir señales WAAS; sin embargo para este ejercicio los datos se registraron con dicha opción deshabilitada. En general, la precisión del receptor es excelente y posiblemente superior al Garmin III+ bajo condiciones de cielo despejado. El 98% de las lecturas están en un radio de 3.5 a 4.4m; esta precisión la logró el Garmin III+ el 8 julio a las 9am en condiciones de cielo nublado y con un PDOP de 1.6. Sin embargo en las otras pruebas realizadas con el Garmin III+ en el mejor de los casos logró un CEP de 5-6m para el 50% del tiempo.

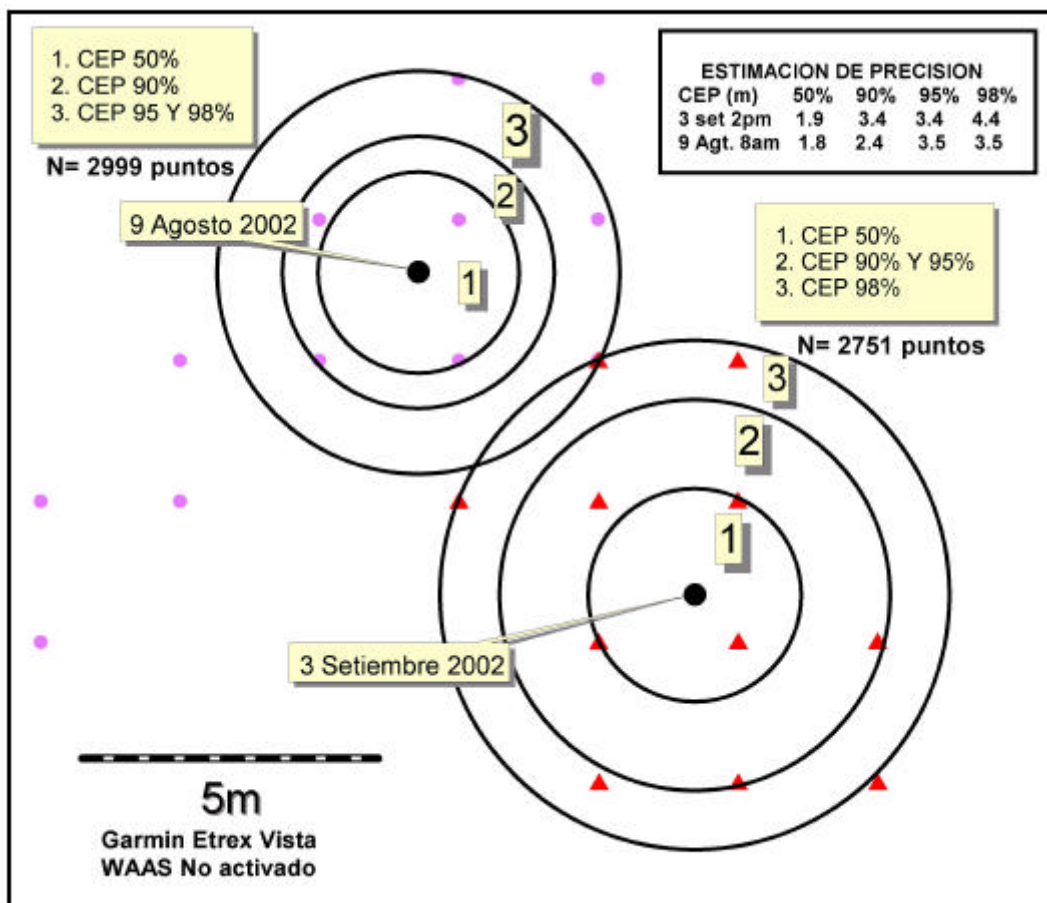


Figura 25: Comparación en la dispersión de puntos para lecturas realizadas a las 8am del 8 de agosto y a las 2pm del 3 de setiembre del 2002. Sabanilla de Montes de Oca, San José. Cielo despejado. WAAS deshabilitado.

La figura 26 muestra la precisión del receptor Garmin Etrex Vista con la opción WAAS habilitada. Las mediciones fueron realizadas el 2 de agosto y el 6 de agosto del 2002 a las 9am bajo condiciones de cielo despejado. La precisión para los diferentes niveles de confianza (50% a 98%) fue muy similar para ambas fechas; lo que indica la consistencia en las lecturas del receptor. En este caso el 98% de las lecturas están en un radio de 3.3 a 3.7m; valor muy similar al reportado por otros investigadores (<http://www.erols.com/dlwilson/gps.htm>) y al obtenido para el receptor sin WAAS (3.5 a 4.4m). Sin embargo los promedios de los dos sets de datos sin WAAS mostraron una diferencia de 7.2m, en tanto que la diferencia para los datos con WAAS fue inferior a 1.5m. En una futura publicación se espera analizar en mayor detalle este tema.

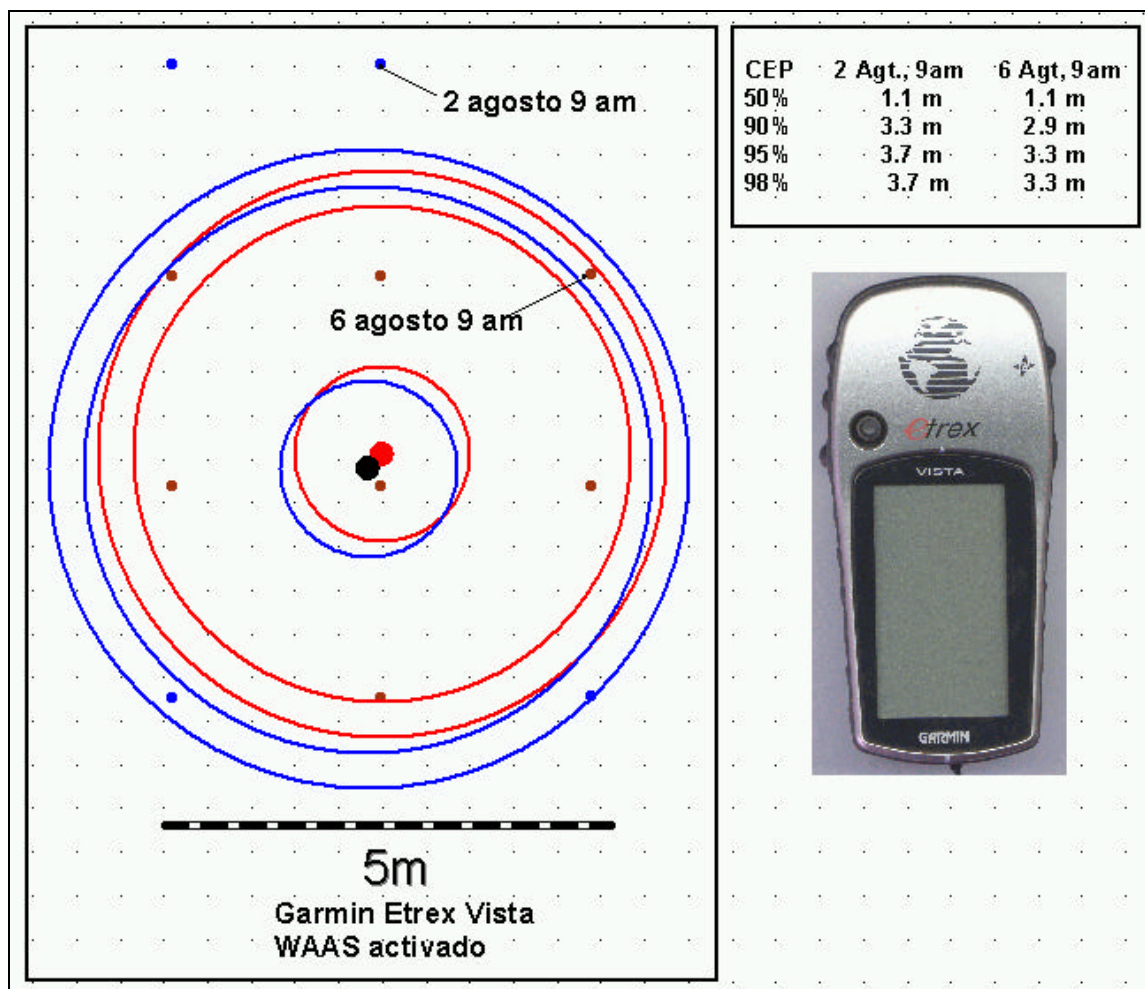
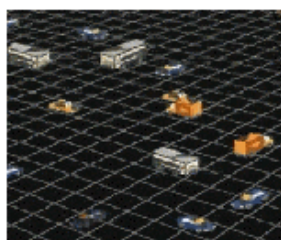


Figura 26: Comparación en la dispersión de puntos para lecturas realizadas el 2 de agosto y el 6 de agosto del 2002 a las 9am. Sabanilla de Montes de Oca, San José. Cielo despejado. WAAS activado.

Aplicaciones de los sistemas de posicionamiento global



Aun cuando la navegación utilizando NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System) fue iniciado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en 1978, sus aplicaciones en el área civil y particularmente en recursos naturales y ambiente es mucho más reciente. El principal uso del SPG en el área de recursos naturales ha sido el proveer ubicaciones o localizaciones de objetos en la superficie terrestre. Algunos ejemplos de aplicaciones del SPG son:

Las áreas de aplicación de los GPS son muy variadas y van desde usuarios individuales que requieren de moderada exactitud como los estudiantes en medio ambiente y recursos naturales hasta los sistemas de navegación utilizados en autos, aviones y barcos; pasando por usos especializados como la geodesia y el estudio de deformación de estructuras tales como puentes. Esta revolución ha

sido posible gracias a los avances logrados en el área de los circuitos integrados; los cuales han permitido crear receptores compactos, resistentes y sobre todo cada vez más pequeños, poderosos y de menor costo. Por ejemplo, los primeros receptores geodésicos de alta precisión introducidos al mercado en la segunda mitad de los años 80 costaban más de US\$100.000; en la actualidad se pueden adquirir receptores con mayor capacidad por unos US\$10.000. En los años 80 se pensaba que los usuarios del sector civil no especializado tendrían que pagar unos US\$2000 por receptores básicos; esta tendencia se mantuvo hasta el año 1992 cuando se introdujo el primer receptor manual con un precio inferior a los US\$1000. En el año 1997 la industria puso al mercado receptores manuales que operaban con dos baterías AA y con un precio de US\$100.

Basado en el error de posicionamiento requerido por el usuario y en el uso que hace del Sistema, este puede ubicarse en una de las siguientes categorías (Enge y Misra, 1999):

- ?? *Alta precisión (milímetros a centímetros).* Los geodestas y los geofísicos utilizan la tecnología GPS para estudiar la deformación de las placas tectónicas, terremotos, volcanes y variaciones en la rotación de la Tierra. También se utiliza en el estudio de deformaciones de estructuras tales como puentes y torres en tiempo real. Las áreas con mayor auge en el área de GPS de precisión han sido la de levantamientos topográficos y la creación de cartografía de gran escala (gran exactitud), la cual pasa luego a formar parte de geobases de datos en Sistemas de Información Geográfica. . Por ejemplo, Kruczynski y Jasumback (1993) reportan errores de 0.5% en la medición de área en modo no diferencial y 0.06% en modo diferencial.
- ?? *Aplicaciones especializadas en aviación y el espacio.* El GPS se utiliza en inventarios aéreos y en fotogrametría. Los científicos atmosféricos utilizan la tecnología para caracterizar en tiempo real la densidad de electrones en la ionosfera y para determinar el contenido de vapor de agua de la troposfera. La Estación Espacial Internacional está diseñada para utilizar GPS con fines de navegación, determinar la orientación angular de la misma con respecto a una referencia geográfica (*attitude*), monitorear los vehículos que se aproximan a la estación y como una fuente de tiempo (reloj) para programar la operación de vehículos.
- ?? *Transporte aéreo, terrestre y marítimo.* El GPS es utilizado como un auxiliar en las diferentes tareas de navegación (Ej. determinar rumbos y distancias, despegues y aterrizajes, navegación en ruta, etc). Previo al establecimiento del GPS, la navegación aérea dependía exclusivamente en lo sistemas de radionavegación terrestres, con la desventaja que son caros de operar y que en muchas parte del mundo no se cuenta ni siquiera con los requerimientos mínimos de radionavegación. El GPS ha sido certificado para operación en el espacio aéreo de los Estados Unidos como un sistema suplementario para tareas tales como navegación en ruta, terminal y las denominadas aproximaciones no precisas de la fase de vuelo; sin embargo es el principal sistema de navegación en áreas remotas y en los océanos. Por ejemplo, la Administración de Aviación Federal de los Estados Unidos reportó el uso exitoso de WAAS en un viaje de prueba realizado a Chile (www.faa.gov/apa/pr). Actualmente la FAA-USA está trabajando en un sistema denominado LAAS (*Local Area Augmentation System*) que permitirá la aproximación y aterrizaje utilizando el GPS bajo condiciones de poca visibilidad. Las mediciones de GPS se han utilizado de manera rutinaria para

determinar las órbitas de vehículos espaciales (satélites, naves) como mayor exactitud que cualquier otro método basado en estaciones terrenas. En el área de transporte terrestre (Ej. vehículos, trenes, transporte pesado) y marítimo (Ej. veleros para recreación, buques tanque, flotas pesqueras, guardacostas, etc.) el GPS es la principal fuente de posicionamiento utilizada con fines de navegación.

?? *Energía y telecomunicaciones (medición de tiempo).* El GPS es un excelente medio para medir tiempo de una manera precisa y confiable. Las empresas proveedoras de servicios de electricidad y telecomunicaciones lo utilizan en tareas que requieran de la medición precisa de tiempo (Ej. sincronizar elementos en redes de telecomunicaciones, sincronizar tiempo en los principales nodos de Internet, control de sistemas de energía).

?? *Usuario general (Ej. montañismo, recreación, medio ambiente, etc.).* Este es posiblemente el grupo más amplio de usuarios y crece con el pasar del tiempo. La reducción en el precio de los georeceptores ha posibilitado su adquisición por parte de una gran cantidad de usuarios. En la actualidad el costo de un receptor puede ser comparable con el de un DVD o una cámara digital. Se espera que en los próximos años se amplíe el uso de receptores de telecomunicación inalámbricos equipados con Internet y tecnología GPS. En un futuro un poco menos cercano se espera que los receptores de GPS cuesten unos US\$10 y que formen parte de otros productos de consumo masivo tales como cámaras digitales, teléfonos y dispositivos de seguridad en cámaras y computadoras.

El futuro del sistema GPS

El futuro del GPS es prometedor desde el punto de vista de los usuarios en el sector civil. El 30 de marzo de 1998, el exvicepresidente de los Estados Unidos de América, Al Gore, anunció que el gobierno tenía planes para modernizar el Sistema. La nueva generación de satélites incluirá dos nuevas señales para uso civil en adición a la existente en la actualidad (L1). El uso de dos frecuencias civiles permitirá a los receptores estimar el efecto de la ionósfera con lo que error en posicionamiento podrá reducirse a menos de 10 metros sin el uso de ningún otro sistema de apoyo (Ej. WAAS, corrección diferencial). Con la presencia de tres frecuencias, el usuario podrá tener acceso a receptores con errores de posicionamiento de unos cuantos centímetros.

Bibliografía

Ashtech. 1997. Rellance under-canopy performance evaluation. USDA Forest Service Clackamas GPS test Network. USA. 7p. www.ashtech.com/

Bennett, V. 1990. GPS program status report. *In*. Protecting Natural Resources with remote sensing. Proceedings of the Third Forest Service Remote Sensing Applications Conference-April 9-13, 1990. pp.334-338 American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, Maryland USA.

Bolstad, P. V. 1993. GPS basics: Forestry applications. The Compiler, Vol.11(3): 4-8.

Claborne Christian. 2001. Answers for GPS + WAAS and Other Stuff GPS for Pilots. waas@cyberthought.com

Dale DePriest. 2002. Differential GPS. www.celia.mehaffey.com/dale/dgps.htm.

Deckert, C. y Bolstad, P.V. 1996. Forest canopy, terrain, and distance effects on Global Positioning System point accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 62(3): 317-321.

DNR_garmin.avx www.dnr.state.mn.us tim.loesch@dnr.state.mn.us Extensión para ArcView GIS creada por el departamento de Recursos Naturales del Estado de Minnesota, USA.

Enge y Misra, 1999. Scanning the Issue. Technology Special Issue on Global Positioning System. PROCEEDINGS OF THE IEEE. Volume 87 Number 1. www.ieee.org

Fallas, Jorge. 2002. MN DNR Garmin. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ciencias Ambientales y Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 26p.

Fallas, Jorge. 2002. Waypoint+: Manual. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ciencias Ambientales y Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 17.

Fallas, Jorge. 2002. Waypoint+ Interfase: Manual. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ciencias Ambientales y Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 13.

Federal Geographic Data Committee. 1998. Part 1, Reporting Methodology, Geospatial Positioning Accuracy Standards, FGDC-STD-0007.1-1998, Washington, D.C. <http://fgdc.er.usgs.gov/fgdc.html>

Gilbert, C. 1993. Portable GPS systems for mapping: features versus benefits. Earth Observation Magazine. October 1993. 4p.

Global Positioning System (GPS).2001. www.leonardo.jpl.nasa.gov/msl/quicklooks/

Global Positioning System marks 20th anniversary.1998. Released: Feb 24, 1998. www.af.mil/news/

GPS WAAS Accuracy. <http://www.erols.com/dlwilson/gps.htm>

Hurn, J. 1989. GPS a Guide to the next utility. Trimble Corporation.USA. 76p.

Hurn, J. 1989. Differential GPS Explained. Trimble Corporation.USA. 55p.

Jennrich, R.I. y Turner, F.B. 1969. Measurement of non-circular home range. J. Theor. Bio. 22:227-237.

Liu, C. J. 1993. GPS accuracy: can GPS fill the need for GIS? The Compiler, Vol.11(3): 18-27.

Kruczynski, L. y Jasumback, A. 1993. Forestry management applications. Forest Service experience with GPS. Jour. of Forestry. Vol. 91(8): 20-24.

Palacio, J. L.; Luna L. y Backhoff, M. A. 1995. Geolink maps Mexico's highways. GPS World. March 1995. 4p.

Slonecker, E. T. y Carter, J. A. 1990. GIS applications of global positioning system technology. GPS World 1:50-55.

Richardson, S. 1995. GPS/GIS mapping zooms in on satellite imagery. Earth Observation Magazine. Septiembre 1995. 2p.

Wilkie, D. S. 1989. Performance of a backpack GPS in a tropical rain forest. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 55: 1747-1749.

Yeazel, Jack. 2001. WAAS and its Relation to Enabled Hand-Held GPS Receivers.

jack@finalapproach.net. www.gpsinformation.net/exe/waas.html

www.faa.gov/apa/pr/pr.cfm?id=1135. [FAA Completes Successful WAAS Flight Trials in the Republic of Chile](http://www.faa.gov/apa/pr/pr.cfm?id=1135)

Sitios web de interés

<http://www.ngs.noaa.gov/GPS/GPS.html>

<http://www.auslig.gov.au/>

<http://www.gpsy.com/gpsinfo/>

http://www.cnde.iastate.edu/staff/swormley/gps/check_sa.html

<http://www.gpsworld.com/>

<http://www.garmin.com/aboutGarmin/>

<http://www.topcon.com/splash.html>

<http://www.gpsnuts.com/myGPS/GPS/Tutorials/Maps/maps.htm>

<http://www.ozieplorer.com/> software

<http://www.freegis.org/>

<http://www.ngs.noaa.gov/GPS/GPS.html>

Australian Surveying and Land Information Group (AUSLIG)

<http://www.auslig.gov.au/geodesy/geodesy.htm>

Federal Geodetic Control Subcommittee

<http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/fgcs.html>

Geodetic Survey of Canada

<http://www.geod.emr.ca>

German Institute for Applied Geodesy

<http://www.potsdam.ifag.de/english/info/ifag-geodaesie-e.html>

Goddard Space Flight Center
Crustal Dynamics data information.

http://cddis.gsfc.nasa.gov/cddis_welcome.html

GPS General Information Sources

http://www.inmet.com/~pwt/gps_gen.html

Institute of Navigation

<http://www.ion.org>

ITS (Intelligent Transportation Systems) Online

<http://www.itsonline.com>

International GPS Service for Geodynamics

<http://igscb.jpl.nasa.gov>

Peter Dana's Overview of GPS

<http://wwwhost.cc.utexas.edu/ftp/pub/grg/gcraft/notes/gps/gps.html>

Southern California Integrated GPS Network

<http://milhouse.jpl.nasa.gov>

U.S. Department of Transportation

<http://www.dot.gov>

U.S. National Earth Orientation Service

<http://maia.usno.navy.mil>

University NAVSTAR Consortium

<http://www.unavco.ucar.edu>

Compañías comerciales

<http://www.thegpsstore.com/site/> venta receptores

<http://www.trimble.com/index.htm> Sitio web de la compañía Trimble

<http://www.gpsnow.com/mggps.htm> venta receptores

<http://www.ashtech.com/> Sitio web de la compañía Ashtech

<http://www.teleport.com/~bestfit>

<http://www.etak.com> Sitio web de la compañía Etak, Inc.

Communication systems International Inc

<http://www.csi-dgps.com>

Differential Corrections Inc. (DCI)

<http://www.dgps.com>

Navtech Seminars & GPS Store

<http://www.navtechgps.com>

Omnistar Inc.

<http://www.omnistar.com>

Starlink Incorporated

<http://www.starlinkgps.com>