

Sistema de Posicionamiento Global - G.P.S. - en Venezuela: Aplicaciones, ejemplos, problemas a considerar y alternativas de solución

Melvin Hoyer

Escuela de Ingeniería Geodésica, Universidad del Zulia

Resumen

Se presentan las potencialidades de aplicación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en Venezuela, describiendo los problemas más importantes que acompañan su utilización en el país y proponiendo alternativas y recomendaciones para lograr un óptimo uso y provecho del mismo. Se incluyen mediciones de campo, procesamiento de ellas y análisis de resultados.

La posibilidad de utilizar el GPS para sustituir o complementar el control geodésico básico del país, la combinación de mediciones GPS con la red de triangulación de primer orden y los factores a considerar para utilizar óptimamente el GPS en Venezuela, son los principales tópicos tratados.

Palabras claves: GPS, aplicaciones, Venezuela, problemas.

Global Positioning System - GPS - in Venezuela: Applications, examples, problems to consider and alternatives to solve.

Abstract

The GPS application potentialities in Venezuela are shown, describing the most important problems related with its use in this country besides purpose of alternatives and recommendations to obtain an optimal and advantages uses from it. The article presents measurings, their calculation and the analysis of results.

The possibility to use GPS to substitute or to complement the Venezuelan first order control network, the combination of GPS measurings with this network and the factors to consider to the optimal use of GPS in Venezuela are the principal treated topics.

Key words: GPS, applications, Venezuela, problems.

Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global - GPS- se ha convertido en una de las herramientas más importantes de las geociencias, en distancias cortas ofrece resultados iguales a los distanciómetros electrónicos, en distancias medias mejores que cualquier técnica disponible en

la actualidad y en distancias largas parecidas a los de VLBI y Laser. El tiempo necesario para la medición oscila entre pocos minutos para el modo cinemático y 1-2 horas para el modo estático y como técnica satelital no requiere intervisibilidad entre las estaciones cuya distancia se determina ni es dependiente de condicio-

nes meteorológicas favorables. (Caturla 1988, Seeber 1989).

Debemos convencernos de que como toda tecnología foránea, tenemos que adaptar su uso a la realidad geodésica de nuestros países, estando de por medio redes, coordenadas y datums diferentes a los países para los cuales se desarrollan las mismas.

El presente artículo tiene como objetivo fundamental presentar la potencialidad de utilización del GPS en Venezuela, describiendo los problemas más importantes que acompañan su utilización en el país y proponiendo alternativas y recomendaciones para lograr un óptimo uso y provecho del mismo. Estas conclusiones, en general, son las mismas para otros países latinoamericanos, africanos y asiáticos.

El GPS en Venezuela

La tecnología satelital de posicionamiento ya tuvo en el país una aceptación completa con el Sistema Transit.

El Sistema Transit, de esta forma le abrió las puertas al GPS en Venezuela y facilita grandemente la propagación de su utilización, gracias además, a sus ventajas en cuanto a exactitud y tiempo de medición necesario para los trabajos en los cuales se emplee.

La utilización del GPS en Venezuela la inicia la empresa petrolera Maraven para mediciones de control de la subsidencia de la costa oriental del lago de Maracaibo, este proyecto comenzó en 1986 con instrumentos Wild-Magnavox 101 y desde entonces se han efectuado varias campañas de medición (Leal, J., 1989).

En Enero de 1988, durante aproximadamente un mes, se realizan las observaciones del Proyecto Internacional de Geodinámica para Centro y Suramérica (CASA), en esta oportunidad se utilizan por primera vez en el país instrumentos de doble frecuencia, Texas TI4100, midiendo también por vez primera líneas bases de más de 240 Km. En este proyecto participaron por Venezuela la Escuela de Ingeniería Geodésica (EIG) de La Universidad del Zulia (LUZ), la Dirección de Cartografía Nacional (DCN) y las filiales de Petróleos de Venezuela (PDVSA) Lago-

ven y Maraven, en conjunto con el Instituto de Investigaciones Geodésicas de Alemania. (Drewes, 1989).

En 1989 por vez primera una empresa privada utiliza la tecnología GPS para varios proyectos, especialmente en el Centro y Oriente del país.

A mediados de este mismo año la Dirección de Geografía y Cartografía de las Fuerzas Armadas (DIGECAFA) recibe 3 unidades Wild-Magnavox las cuales ha utilizado desde entonces en proyectos varios.

En Octubre de 1989 arriban al país las tres unidades marca TRIMBLE modelo ST adquiridas por la EIG de LUZ mediante convenio con la empresa petrolera CORPOVEN filial de PDVSA, pocos meses después se iniciaron las mediciones para el proyecto APTE de esta empresa tendiente a dar apoyo geodésico a labores de prospección sísmica.

La filial Lagoaven por intermedio de una empresa privada comienza en el último trimestre de 1990, un ambicioso proyecto exploratorio en el Delta del Orinoco y áreas cercanas, en el cual se utilizará el GPS como control geodésico.

En Enero de 1992 el Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional del Ministerio del Ambiente adquiere 3 receptores de doble frecuencia marca Trimble.

Posteriormente, además, 3 importantes empresas privadas de Geodesia adquieren varias unidades receptoras de señales GPS.

La Dirección de Fronteras del Ministerio de Relaciones Exteriores ha efectuado mediciones, con esta tecnología satelital, en conjunto con organismos oficiales de Brasil.

Hace muy pocos años, la salida al mercado venezolano de un instrumento receptor GPS del tamaño de una calculadora de bolsillo ha impactado el medio geodésico, contándose entre sus potenciales usuarios al Ejército, la Dirección Nacional de Catastro del Ministerio de Agricultura y Cria (MAC), el Instituto Agrario Nacional (IAN) y varias empresas privadas.

La calidad de los resultados que ofrece el sistema GPS lo hacen favorablemente competitivo con respecto a otras técnicas. Por estas

razones podemos tener la seguridad de que en corto tiempo en Venezuela al igual que en otras partes del mundo el GPS será la técnica geodésica más utilizada.

Comparaciones y consideraciones de calidad sobre algunas mediciones efectuadas

Proyecto Barinas

El objetivo de este trabajo fue medir puntos de apoyo para trabajos geodésicos convencionales en instalaciones petroleras del Edo. Barinas. Las estaciones estuvieron apoyadas en un vértice con coordenadas conocidas en los sistemas Transit y GPS. Las mediciones se efectuaron durante 2 días solamente, con 3 instrumentos marca TRIMBLE modelo ST (una sola frecuencia), sobre 5 estaciones, donde todas las líneas bases son menores de 10 Km (Ver gráfico 1a) y en 2 sesiones por día de aproximadamente 2 horas cada una.

Consideraciones sobre las anotaciones de campo

Durante las mediciones se puede leer en la pantalla del instrumento los resultados instantáneos que se van obteniendo a partir del procesamiento interno de las señales recibidas del satélite. Aún cuando la importancia de estas coordenadas es casi nula, se presentan a continuación algunas consideraciones sobre estos valores que se obtienen en el campo y que pueden ser anotados para analizar durante el trabajo la variación de los mismos y tener la primera indicación de la calidad de las observaciones, antes del procesamiento de ellas con un software especial, que tome en cuenta, además, las mediciones de las otras estaciones que se observaron simultáneamente.

Generalmente, se recomienda anotar al comienzo y al final del trabajo y cada 15 ó 30 minutos, los valores de latitud, longitud, altura, PDOP y satélites observados, así como el número de mediciones continuas y totales a cada satélite.

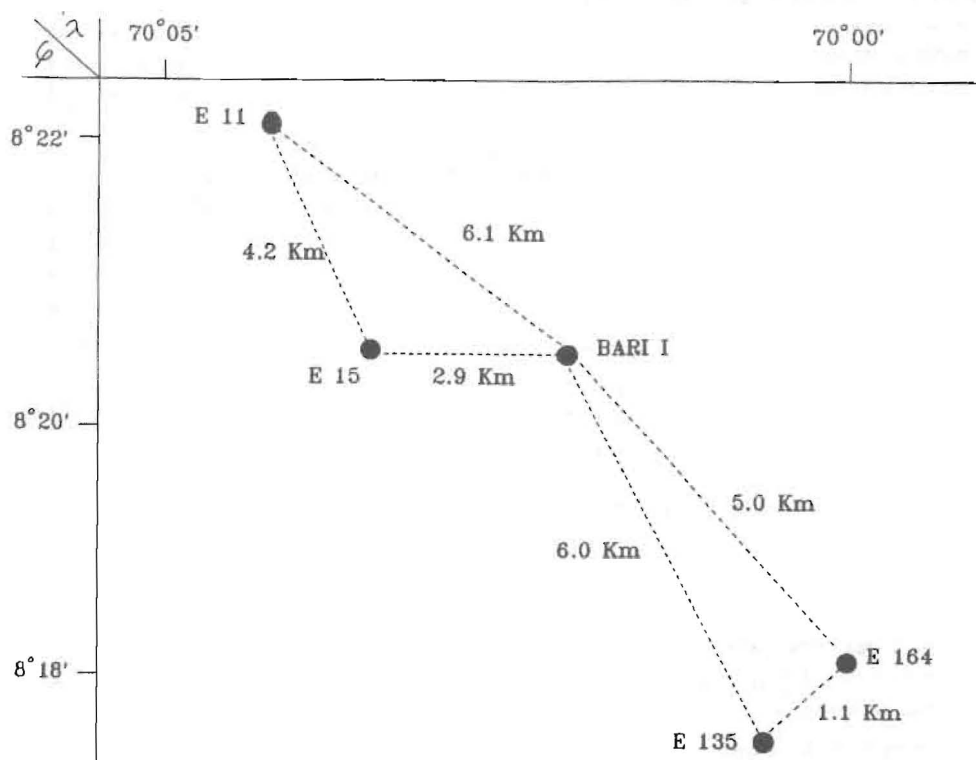


Figura 1a. Estaciones medidas en el proyecto Barinas

Las coordenadas que presenta el aparato son el producto de las mediciones de pseudo-distancia que el realiza, tomando en cuenta solo esa estación, en general no tienen interés geodésico, pero vale la pena hacer algunos comentarios al respecto.

Las diferencias en los valores de las coordenadas producidas en el campo pueden ser muy variables, especialmente la altura es la coordenada más sensible a éstos cambios.

Las diferencias máximas en las coordenadas que presenta el instrumento en una estación alcanzaron en estas mediciones valores máximos de hasta 130 m en latitud, 75 m en longitud y 270 m en altura y valores mínimos cercanos a los 5 m en latitud y longitud y 10 m en altura.

Las sesiones que arrojaron mejores resultados con el procesamiento posterior, son precisamente las sesiones que cada día presentaron diferencias más grandes en los valores de campo.

Esto permite concluir que la consistencia interna de los valores de las coordenadas que presenta el instrumento en el campo, no puede ser un criterio para aceptar o rechazar mediciones, es solo un indicativo de la buena calidad de los resultados pero no de la posible mala calidad de los mismos. En todo caso deben post-procesarse las mediciones para aceptar o no las observaciones.

Por otro lado, si las variaciones son muy suaves, puede estarse casi seguro de que se han registrado datos confiables, estando en este caso en presencia de mediciones que sin post-procesar alcanzan exactitudes mejores que los 5m en posición y 10m en altura, lo cual es indicativo de las ventajas del GPS en posicionamiento instantáneo (sin considerar la S.A., Selective Availability).

En conclusión, las coordenadas obtenidas en el campo por una estación individual no pueden utilizarse como criterio para evaluar la calidad de las mediciones de varios instrumentos que van a ser post-procesadas.

Además la calidad de estas coordenadas "crudas" del campo puede ser muy buena, mejor que 5m en cada dirección, o muy mala, peor que

100 m en cada dirección. La disponibilidad selectiva (Selective Available) es la causa del límite superior de estas estimaciones.

Análisis de las líneas bases

Al comparar los resultados del cálculo de las mediciones como líneas simples con los de líneas múltiples (diferentes opciones que ofrece el software de la casa Trimble, nov. 1989), se puede concluir que en algunos casos, el cálculo de líneas múltiples no mejora los resultados con respecto al de líneas simples.

Estos resultados, sin embargo, no deben generalizarse, pues la experiencia indica que especialmente para grandes redes y distancias, el procedimiento de multiestación con software que permita considerar varias estaciones y sesiones, debe ser superior al ajuste de líneas simples, en particular con respecto a la confiabilidad de las mismas.

Al comparar, además los cálculos de líneas múltiples asignando las coordenadas de un extremo de la línea o dejando que el programa use las determinadas por pseudorange para ese punto, se puede notar diferencias de solo 1 y 2 mm para las líneas bases, obtenidas en uno u otro caso.

Proyecto Zulia

El objetivo de este trabajo fue hacer mediciones GPS sobre diferentes estaciones del Edo. Zulia con la finalidad de comprobar la bondad del sistema y del instrumental, en vértices con coordenadas conocidas por otras tecnologías.

Se realizaron las mediciones sin considerar condiciones realmente favorables para las mismas, esto permitiría tener estimaciones de resultados a obtener, por ejemplo, con las configuraciones satelitales disponibles buenas o no, además, combinando distancias largas y cortas en los triángulos a medir.

Se midieron 7 estaciones: Mamón, Hospital, Colegio, Grano de Oro, Cañada, Aeropuerto, Bachaquero y Machiques (Ver gráfico 1b). Las mediciones se efectuaron con 3 unidades receptoras marca TRIMBLE modelo ST (una sola frecuencia).

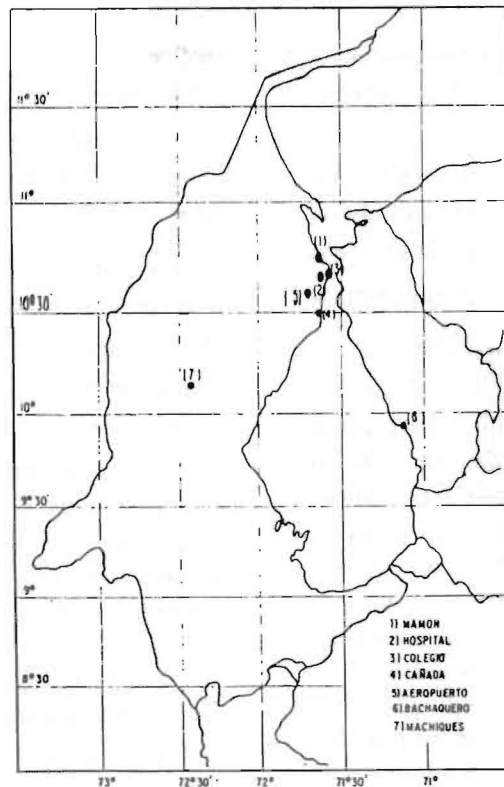


Figura 1b. Estaciones medidas en el Proyecto Zulia.

De las estaciones medidas, Mamón, Hospital, Cañada, Machiques y Bachaquero son vértices del control básico de la Dirección de Cartografía Nacional, de los cuales Hospital, Machiques y Bachaquero han sido medidos además con el Sistema Transit. Colegio, Grano de Oro y Aeropuerto son puntos nuevos.

Análisis de algunos resultados

Las mediciones ejecutadas en tres fechas diferentes con intervalos de meses entre ellas permiten una gran variedad de cálculos y comparaciones.

Por ejemplo, se ejecutó la medición de una línea larga en dos fechas diferentes, en dos sesiones, con la finalidad de analizar el resultado a obtener, considerando que los instrumentos utilizados son de una sola frecuencia, lo cual limita a pocos Kms (aproximadamente a 10) la separación entre las mismas para mediciones simultáneas.

En una fecha se observó la línea Mamón-Bachaquero (106 Km) y en otra fecha se observó Mamón-Machiques (109 Km).

Para la línea Mamón-Bachaquero resultó fallida la segunda sesión, pues el rms obtenido está fuera del rango permitido, sin embargo las diferencias entre las distancias de las dos sesiones fué de 1.49 m ($14 \cdot 10^{-6}$).

En la línea Mamón-Machiques la diferencia entre las dos sesiones fue solo de 21.8 cm ($2 \cdot 10^{-6}$).

Si se toma en cuenta las limitaciones del instrumento y la longitud de la línea, los resultados parecen muy interesantes para evaluar las posibilidades del sistema y del equipo en bases largas, pudiéndose considerar muy buenos los resultados especialmente los de la línea Mamón-Machiques.

Comparación entre coordenadas GPS y coordenadas DCN

Tal como se mencionó al describir el proyecto, se midieron varios vértices con coordenadas conocidas en el sistema de la DCN.

Para el cálculo de las coordenadas de la estación Mamón se utilizaron como coordenadas fijas las de Hospital provenientes de las mediciones satelitales Doppler (Transit) obtenidas

en (Hoyer, 1982 a), las cuales fueron transformadas del datum WGS-72 utilizando parámetros internacionales.

Una vez obtenidas las coordenadas GPS para Mamón, se fijaron éstas para el cálculo de las otras estaciones, ya que ésta fue la estación ocupada permanentemente durante el proyecto.

Para hacer las transformaciones de las coordenadas GPS en el datum WGS-84 al datum La Canoa, se ha seguido el siguiente procedimiento: primero la transformación al WGS-72 y luego a la Canoa. Para esta última transformación se han utilizado los parámetros publicados en (Hoyer, 1986), para el Edo. Zulia por considerarse los más apropiados.

A pesar de que siempre resulta interesante la comparación entre coordenadas "nuevas" obtenidas con un sistema satelital, en este caso GPS y las coordenadas existentes para los vértices de la DCN, debe llamarse la atención de que esta comparación muchas veces es inútil y que los resultados pueden ser muy variables, permitiendo esta contrastación de valores, solo la detección de errores groseros en uno de los grupos de coordenadas.

Al efecto debe recordarse que la naturaleza de ambas coordenadas es diferente, puesto que provienen de metodologías diferentes. Es absurdo, por lo tanto, "evaluar" la calidad de las

mediciones GPS por su parecido o coincidencia con las de la DCN.

Y lo contrario solo sería posible si se conoce a ciencia cierta la calidad absoluta de las mediciones GPS.

En la tabla 1 se presentan las coordenadas para las estaciones Mamón, Cañada, Machiques y Bachaquero en el datum nacional La Canoa, en primer lugar las obtenidas por GPS y en segundo lugar las de la red nacional.

Las diferencias entre las coordenadas GPS y DCN para las estaciones Mamón, Cañada, Machiques y Bachaquero en el Datum nacional La Canoa, están en el orden de + 0.86 y + 0.04 en Latitud y - 2.00 y - 0.33 en Longitud (Ver tabla 2).

Comparaciones entre coordenadas GPS y coordenadas Transit.

Tres de las estaciones ocupadas en el proyecto, Hospital, Bachaquero y Machiques forman parte de la red Doppler medida en 1980 (Hoyer, 1982 b). Sin embargo, ya que Hospital fue utilizado como estación fija para obtener las coordenadas GPS de las otras estaciones, se presenta solo la comparación entre las otras dos restantes.

Esta comparación resulta interesante por dos razones, en primer lugar se trata de dos

Tabla 1.
Comparación entre coordenadas GPS y DCN en el Datum La Canoa

ESTACIÓN	GPS		DCN	
	ϕ	λ	ϕ	λ
MAMON	10° 46' 33" .23302	71° 39' 54" .93620	10° 46' 33" .26200	71° 39' 54" .90700
CAÑADA	10° 29' 30" .70792	71° 39' 21" .77883	10° 29' 30" .71100	71° 39' 21" .74700
MACHIQUES	10° 08' 36" .53076	72° 25' 59" .02421	10° 08' 36" .53200	72° 25' 59" .01300
BACHAQUERO	09° 58' 21" .53923	71° 08' 02" .86166	09° 58' 21" .55800	71° 08' 02" .79400

Tabla 2.
Diferencias DCN - GPS en el Datum
La Canoa (valor lineal, mt.)

ESTACION	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$
MAMON	+ 0.86	- 0.87
CAÑADA	+ 0.09	-0.95
MACHIQUES	+ 0.04	- 0.33
BACHAQUERO	+ 0.56	- 2.00

sistemas satelitales, de naturaleza muy semejante aún cuando de generaciones tecnológicas y geodésicas diferentes; por el otro, debe advertirse una vez más, que las líneas bases a partir de las cuales se obtuvieron las coordenadas de estas dos estaciones, no son las más apropiadas, por su longitud de más de 100 Km considerando el instrumental empleado.

Las diferencias entre GPS y Transit en Machiques son apenas de 38 cm en latitud y 17 en longitud, lo cual parece muy bueno. En Bachaquero, aún considerando la posible baja calidad de las coordenadas GPS de esta estación, se obtienen diferencias de 1 m en Latitud y 1.86 m en Longitud.

Proyecto CASA

Las mediciones de la primera fase (1988) del Proyecto Internacional CASA "Mediciones GPS en Centro y Sur-América". (Drewes y otros, 1989) con objetivos netamente geodinámicos por parte de las instituciones extranjeras involucradas, fueron utilizadas por el autor para investigaciones geodésicas de interés nacional (Hoyer, 1990).

De esta forma, los objetivos nacionales del proyecto fueron: la conexión de redes locales y nacionales con el sistema satelital GPS; la combinación con la red de triangulación de pri-

mer orden, con miras a su evaluación y mejoramiento y el análisis local de la situación geodinámica del área.

Si bien, simultáneamente fueron ocupadas estaciones en varios países del continente, mencionaremos solamente lo correspondiente a Venezuela.

En el país se efectuaron las mediciones ocupando un total de 5 estaciones: Por Fin, Batey, Mérida, Barinas, Uribante (Ver gráfico 1c).

Por Fin es un vértice de primer orden de la triangulación de la DCN, Mérida y Uribante son puntos de redes locales, Barinas es un vértice poligonal de la DCN y Batey es un punto nuevo.

El instrumental utilizado fueron 3 unidades georeceptoras TEXAS TI4100 de doble frecuencia. La rigurosidad con la cual fueron realizadas las mediciones (redundancia de observaciones, tiempo de observación por estación, etc), el instrumental utilizado y el software con el cual se hizo el procesamiento (Rothacher y otros, 1988), hacen que los resultados de este proyecto hayan alcanzado exactitudes sumamente confiables y respetables. Por ejemplo, líneas bases de 50 a 240 Km de longitud tienen exactitudes internas de 3 a 7 mm y las diferencias de coordenadas cartesianas geocéntricas también de 3 a 7 mm. Esto convierte a las coordenadas obtenidas en el proyecto CASA en un buen "comparador" para mediciones de otra y de la misma naturaleza de GPS que deben efectuarse en el país. En (Hoyer 1990) se presentan detalles de los análisis efectuados con estas mediciones para cumplir los objetivos nacionales.

El GPS como control geodésico básico del país

El estado actual del control geodésico de Venezuela y las características del GPS en cuanto a su exactitud y facilidad de utilización, promueven el análisis de factibilidad sobre la posible sustitución o complementación de las redes de control existente en Venezuela con esta nueva tecnología satelital.

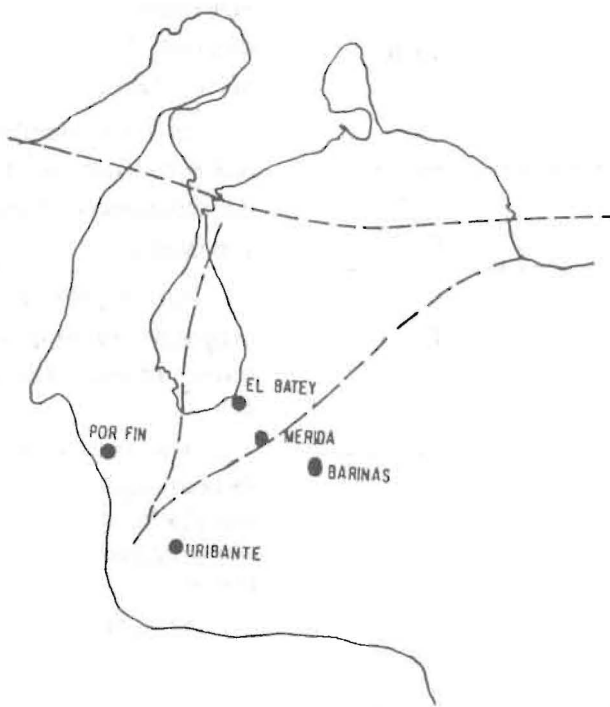


Figura 1c. Estaciones medidas en el Proyecto CASA

Este análisis es interesante en el caso de Venezuela así como en el de cualquier otro país sub-desarrollado (Lunar, 1989).

Estado actual del control geodésico básico del país

El control geodésico fundamental de Venezuela está constituido por las redes de triangulación de primer orden, poligonales de precisión, circuitos de nivelación y red gravimétrica de primer orden. Vale la pena destacar la limitada cobertura de este control. Para el análisis es necesario tomar en consideración los siguientes aspectos:

- a.- Vértices destruidos.
- b.- Descripciones no actualizadas.
- c.- Falta de ajuste conjunto.

Alternativas de solución

Al respecto se proponen las siguientes alternativas de solución:

- a.- Reconstrucción y remediación de la red por métodos convencionales.

b.- Sustitución del control existente por la metodología GPS.

c.- Combinación de GPS con métodos convencionales.

Es evidente que la primera alternativa no resistiría el más ligero estudio de factibilidad económica. La segunda alternativa ofrecería en el trabajo, por consiguiente bajos costos de ejecución y la mayor exactitud posible de alcanzar para trabajos de esta naturaleza. Por el contrario significa un cambio de sistema y requeriría de patrones de transformación y adaptación al nuevo control geodésico.

La última alternativa conjugaría las ventajas y desventajas de las otras dos, sin embargo debe ser cuidadosamente analizada la heterogeneidad resultante para el sistema si no se toman las debidas precauciones en la implementación de la combinación, especialmente desde el punto de vista de la rigurosidad de las transformaciones necesarias y de la compensación conjunta.

En realidad la solución más acorde al problema dependerá de dos factores: POLITICA para el trabajo y RECURSOS disponibles (ambos dependientes de los organismos oficiales del país).

De existir los suficientes recursos humanos y económicos, evidentemente la alternativa del GPS sería la más conveniente.

En caso contrario, una posible solución de combinación sería la siguiente:

Se propone la medición de una estación GPS aproximadamente cada 100 Km sobre las cadenas de triangulación y circuitos poligonales de todo el país, de manera que la gran mayoría de los puntos coincidan con el control existente o puntos a ser recuperados, quedando el control convencional restante como densificación de estos vértices GPS.

Esto implicaría lógicamente, un ajuste conjunto mediante un moderno software de compensación de redes y dotación a las estaciones GPS de su respectiva altura elipsoidal.

De acuerdo a la extensión del control básico del país y según la modalidad propuesta, sería necesario medir solamente aproximadamente 100 estaciones GPS, lo cual con un número de seis instrumentos y midiendo 5 puntos nuevos por día, (en dos sesiones diarias) requeriría de solo 20 días, aproximadamente, efectivos de trabajo para completar el mismo. El problema logístico más importante a ser resuelto será el rápido transporte y acceso entre los puntos.

La importancia del trabajo a realizar debe obligar a garantizar la disponibilidad de suficientes recursos, de manera de poder contar, si es posible, con más de 6 receptores simultáneamente, lo cual permitiría medir más líneas bases redundantes entre sesiones y observar durante periodos más largos que asegurarán la consideración de diferentes condiciones ionosféricas y resultados más confiables.

Para que un proyecto de esta naturaleza tenga el debido éxito, es necesario tomar muchas precauciones técnicas y logísticas.

Una ventaja adicional, de la proposición presentada, serían los aportes a la solución del problema de las alturas. La tridimensionalidad

de los vértices GPS, mejoraría la calidad de las cotas de los vértices de triangulación, haciéndolos utilizables para casi todos los propósitos de referencias verticales. Para este efecto es estrictamente necesario, vincular las nuevas estaciones mediante nivelación, con puntos de altura conocida y luego corregir por la ondulación del geode para obtener la altura elipsoidal en el datum Canoa de estos puntos. La determinación puntual de estas ondulaciones debe ser objeto de proyectos específicos, pero es absolutamente necesario.

La realización de la alternativa propuesta, garantizaría al país un control geodésico fundamental de altísima calidad, fácil de mantener y de mejorar, de acuerdo a los nuevos algoritmos de ajuste para grandes redes que vayan desarrollándose.

GPS para el control y mejoramiento de la red fundamental del país

Independientemente de las alternativas planteadas en el punto anterior, el GPS es una potente herramienta para garantizar el mejoramiento y control de la red básica de un país, lo cual sigue siendo una necesidad en países como Venezuela, a pesar de las contribuciones que al respecto hizo el Sistema Transit.

Anteriormente se han efectuado investigaciones sobre éste tema (Hoyer, 1982 b), sin embargo es conveniente analizar los nuevos aspectos que deben considerarse al trabajar con GPS:

1. Desde el punto de vista del cálculo de compensación, puede ser problemática la combinación de mediciones con exactitudes tan diferentes, en un ajuste de envergadura. La exactitud de las coordenadas GPS (mm o cm) contrasta con la calidad que ángulos y distancias derivan para la red terrestre (dm o m). Como es sabido, la homogeneidad de calidad en los diferentes tipos de observaciones, contribuye al resultado del ajuste correspondiente.
2. Otro problema a considerar es la exacta definición de la calidad de los puntos GPS. Al combinar mediciones satelitales con

convencionales siempre ha sido tema de discusión y análisis, la relación entre precisión y exactitud de las mediciones satelitales.

3. Además, parecería obvio pensar, que al aumentar la calidad de los puntos satelitales, podría disminuir el número de éstos, necesarios para la combinación y el mejoramiento.

4. Por otro lado, siendo la distancia entre dos estaciones la medición básica a obtenerse con GPS, podría jugar un papel importante en la compensación, la inclusión de distancias de alta exactitud, en lugar de coordenadas.

Todos estos aspectos, añaden ingredientes nuevos al análisis de la combinación, mejoramiento y control de mediciones convencionales y satelitales.

Ante la imposibilidad de hacer mediciones GPS especiales para la investigación, debido a las limitaciones instrumentales (se requeriría equipo de doble frecuencia, el cual no estaba a disposición), se optó por simular las mediciones en la compensación, basándose en los resultados del proyecto CASA, utilizando el software presentado en (Hurtado y Rincón, 1989).

El proyecto CASA comprendió la medición de líneas bases medias y largas, entre 50 y 240 Km, con instrumental de doble frecuencia y bajo rigurosas condiciones de trabajo y procesamiento.

Estas serían características fundamentales que deberían tener las mediciones a realizar para estos fines, por esta razón es posible considerar que las exactitudes de las coordenadas de las estaciones medidas en el proyecto CASA, puedan usarse como referencia para la compensación.

Las diferencias de coordenadas de las estaciones medidas en el proyecto CASA tienen una desviación estándar de 3 a 7 mm y las líneas bases aproximadamente igual; se cree conveniente utilizar como exactitud de las observaciones GPS entre 3 y 5 veces los valores anteriores. Sin embargo, prudentemente se ha utilizado en los cálculos un valor máximo de 5 cm de exactitud para las coordenadas y las líneas bases.

Se procedió a efectuar una serie de cálculos, tomando como base la red de triangulación de primer orden que cubre los Edos. andinos y el Edo. Zulia (400 Km y 260 Km) con un total de 152 puntos, variando las condiciones de las mediciones satelitales, para derivar conclusiones sobre la combinación.

Básicamente las variantes comprendieron el cambio del número de puntos satelitales, de la exactitud de los mismos y su sustitución por líneas bases.

Se utilizaron 8 o 4 puntos satelitales en la compensación. Ocho fue el número óptimo de puntos que se concluyó a partir de análisis de la combinación con puntos Doppler y cuatro es el

número mínimo que de acuerdo a la extensión de la red pudiesen utilizarse. En cuanto a las exactitudes de las mediciones GPS se ha trabajado con un margen de 1m a 5 cm para notar escalonadamente los aportes de la calidad de los puntos en el ajuste.

Pudo concluirse que la introducción de coordenadas GPS en la compensación de la red mejora considerablemente la calidad de las coordenadas resultantes. Esta mejoría obviamente es proporcional a la exactitud de las coordenadas introducidas como observaciones.

Claramente se puede notar que en la red estudiada los mejores resultados se obtienen con la inclusión de 8 puntos satelitales con exactitud de más o menos 5 cm.

Se puede derivar también que se notan mejores resultados con una cantidad mayor de puntos satelitales de mediana calidad, que con menos puntos de las más alta exactitud. Es decir, puede ser más importante, en algunos casos, la cantidad de puntos que la exactitud de los mismos. Esto puede justificarse por la extensión de la red y el número de puntos GPS involucrados.

El mejoramiento en las distancias y acimutes de la red no admite discusión desde el punto de vista de la inclusión o no de los puntos GPS, pero si parece interesante analizar la cuantía de ese mejoramiento en función de la exactitud de estos puntos.

Pareciera que el incremento de exactitud de los puntos satelitales, si bien siempre se

manifiesta en la calidad relativa de la red, no lo hace en una forma proporcional a la exactitud de estos puntos.

En general el análisis de los cálculos permite corroborar 100% las conclusiones derivadas en la investigación con puntos Doppler para la optimización del mejoramiento de la red. Además se pueden derivar estimaciones reales del incremento de este mejoramiento al utilizar coordenadas GPS en lugar de Doppler y puede comprobarse de acuerdo a la experiencia que arrojó el procesamiento, que la problemática de diferencias de exactitudes grandes entre las mediciones convencionales y las satelitales, debe ser muy bien atendido por el software utilizado. En (Hoyer, 1990) se presentan detalladamente los resultados del análisis.

Factores a ser considerados para la utilización del GPS en Venezuela

Puntos de apoyo

La utilización más frecuente del GPS será para hacer determinaciones relativas de posición. La opción más lógica será apoyar las mediciones en estaciones del control básico del país establecido por la Dirección de Cartografía Nacional. Al efecto deben considerarse las características propias de este control:

a.- Dimensionalidad.

Existe en Venezuela una red de triangulación y una red de nivelación, por lo tanto no hay un control básico tridimensional como lo requeriría el GPS. Las estaciones de triangulación tienen altura trigonométrica, la cual no tienen una exactitud equivalente a la posición. Muy pocos puntos pertenecen simultáneamente a ambas redes (de triangulación y de nivelación), lo cual sería lo óptimo.

Ante esta circunstancia, trabajos precisos y bien planificados, deberían apoyarse en vértices con posición y altura de calidad, esto puede lograrse transportando hasta el punto de control la(s) coordenada(s) complementaria(s) que sea necesario.

Por ejemplo, puede buscarse el BM más cercano al punto de triangulación seleccionado y vincularlo mediante nivelación, sin considerar el problema adicional de la ondulación del geoide en el punto, lo cual debe tratarse en forma separada.

b.- Distribución geográfica.

Bastaría una ligera mirada al mapa del control básico del país, para corroborar que amplias zonas del mismo no están cubiertas por este control. De requerirse un trabajo en una zona desprovista de control, quizás sea conveniente hacer mediciones adicionales para enlazar con vértices del control más cercano.

Valdría la pena sin embargo, analizar la conveniencia de utilizar puntos de apoyo diferentes a los de la DCN, esto dependerá de la exactitud de estos puntos y del trabajo a realizar.

c.- Heterogeneidad

El control básico utilizado para apoyar mediciones GPS pueden ser vértices de triangulación o de poligonales, en lo que respecta a posición y BM o alturas trigonométricas, en lo que respecta a altura. Además, el hecho de que la red nacional de triangulación esté conformada por cadenas medidas y ajustadas en forma separada, le dan al control básico del país una característica de heterogeneidad, que debe analizarse al apoyar mediciones GPS.

Por ejemplo, un proyecto GPS extenso puede requerir el apoyo en varios puntos, los cuales posiblemente pertenecen a cadenas diferentes o son alternadamente de triangulación o de poligonación. De concluirse que la influencia de estos factores es inaceptable en los resultados del proyecto, entonces el trabajo se dificultaría al obligarse a ser selectivo en el control a utilizar.

d.- Estimaciones de calidad.

De acuerdo a la metodología a ser utilizada o a las posibilidades del "software", podría considerarse que los puntos de apoyo son libres de errores o asignársele una estimación de calidad específica. En este último caso deben hacerse análisis muy detallados para concluir qué magnitud de error se le asignará a estos vértices.

En ausencia de una compensación completa de la red nacional, las estimaciones de

calidad que existen provienen: a) de la distribución de errores angulares en cada cadena (no publicado por la DCN), b) de estudios como el publicado por el IAGS en 1960 (IAGS, 1960), en la cual se asigna la desviación estándar de los ángulos en cada cadena o c) de investigaciones y comparaciones con otro tipo de tecnología (Transit, Inercial, etc). Algunas investigaciones han permitido sacar conclusiones utilizables en algunas zonas del país (Hoyer, 1982 a), en otros casos debe analizarse este problema detenidamente.

Parámetros de transformación

Al medir con GPS obtenemos coordenadas en el elipsoide asociado al WGS-84, por lo tanto obtenemos coordenadas elipsoidales.

Para expresar estas coordenadas GPS en el Sistema Nacional del respectivo país, en este caso el datum La Canoa, deben conocerse los parámetros de transformación entre ambos datums.

Esto significa que para transformar coordenadas GPS al datum La Canoa, necesitamos parámetros de una altísima calidad, de manera que la exactitud obtenida con la tecnología satelital no se "pierda" al hacer la transformación.

El problema de los parámetros de transformación ha sido tratado ampliamente por el autor en otras publicaciones (por ejemplo, Hoyer 1982 a y Hoyer 1986).

Tomando en consideración lo antes planteado, hasta tanto no se conozcan parámetros confiables para transformar de WGS-84 a Canoa, se recomienda utilizar como puente el WGS-72. De esta forma se garantiza que la única incertidumbre que se introduce en la transformación es la de los parámetros de Hoyer, (1986).

Por otra parte, además de la alternativa actual de transformación antes presentada, debe pensarse en un proyecto nacional que permita la obtención de parámetros confiables y de altísima calidad, de manera que la calidad de las mediciones GPS se mantenga al transformarlas al datum La Canoa, este proyecto debe incluir no sólo la medición sobre una gran cantidad de puntos con posición y altura conocidas en el

sistema nacional, además de un ajuste independiente de las mediciones GPS que permita la aplicación eficiente de un modelo de similaridad adecuado.

No debe prestarse a confusión el hecho de que la disponibilidad de buenos parámetros de transformación es suficiente para obtener coordenadas precisas en el datum nacional. Se sobreentiende que es fundamental apoyar todas las mediciones GPS en al menos un punto (preferiblemente varios) con coordenadas conocidas en el datum nacional, puesto que debido a la inexactitud de las mediciones GPS absolutas, la transformación de observaciones GPS en puntos simples o redes aisladas, no tiene ningún sentido, ni siquiera con excelentes parámetros de transformación.

En todos aquellos casos, en los cuales sea posible trabajar "internamente" con el datum satelital WGS-84 en forma relativa de una medición con respecto a otra, que no requiera la transformación inmediata a Canoa, se recomienda hacerlo de esta forma.

Alturas

El sistema de alturas utilizado en Venezuela es el de las alturas ortométricas, por lo tanto debemos reducir la altura elipsoidal obtenida por GPS (y transformada a Canoa) a altura ortométrica, para lo cual necesitamos conocer la ondulación del geoide. Por lo que la óptima utilización de las alturas derivadas de GPS, estará condicionada a la calidad de la ondulación del geoide. En Venezuela, como es conocido, no se dispone de adecuada información geoidal.

Al igual que en el caso de los parámetros de transformación, el problema de las alturas limita grandemente la posibilidad de mantener la exactitud de las mediciones GPS una vez realizadas las transformaciones necesarias al sistema nacional. Alternativas posibles, no de solución, sino de consideración del problema, serían las siguientes:

- De ser posible, trabajar en forma relativa en el sistema de alturas del satélite, evitando así la transformación de datum y la reducción geoidal.

- Utilizar modelos globales del geode, a pesar de su baja exactitud.
- Investigar la existencia de perfiles geoidales en el área de trabajo.

Falta de investigaciones concluyentes

Tal como puede derivarse de lo expresado en los puntos anteriores, la verdadera influencia de esos y otros factores debe investigarse y obtenerse conclusiones al respecto. Sin embargo no disponemos de suficiente cantidad de mediciones GPS en Venezuela, ni de las correspondientes investigaciones para conocer esos efectos, por ahora.

Falta de especificaciones

Se corre el riesgo de que la ausencia de especificaciones nacionales para las mediciones GPS, derive en diversas y arbitrarias modalidades de medición y expresión de resultados. Al efecto se hace imperativo que la DCN, organismo oficial rector de la geodesia en el país, propicie la formulación de tales especificaciones.

Banco de mediciones

Dentro de cualquier proyecto de especificaciones debe contemplarse la obligatoriedad de suministrar a un ente oficial los resultados de todas las mediciones GPS que cumplan con ciertas condiciones también especificadas, esto conformaría un banco de información de gran utilidad para una gran cantidad de usuarios. Este banco de datos debe incluir la matriz V-C de las mediciones GPS.

Conclusiones

1.- El GPS se está utilizando en Venezuela para diversos fines y objetivos por parte de diferentes entes, en corto plazo su utilización será muy intensiva en el país por parte del medio geodésico y extra-geodésico.

2.- La óptima utilización de GPS en Venezuela requerirá de la consideración y solución de una serie de factores, entre los cuales destaca el control básico de apoyo, la falta de especificaciones, la falta de parámetros de transformación entre los datums, la falta de información geoidal, etc.

3.- Las anotaciones en campo de las coordenadas de una estación durante la medición, pueden servir solamente como indicativo de la posible bondad de las mismas, pero no pueden utilizarse como criterio de rechazo de posibles mediciones de baja calidad.

4.- Los resultados de diferentes líneas bases medidas con longitud variada corroboran las precisiones de 1 ppm y aún mejor que se acreditan a la tecnología GPS. La repetibilidad de los resultados entre diferentes formas de procesamiento (líneas simples y múltiples, coordenadas fijadas o no) ratifican estas precisiones.

5.- La comparación entre coordenadas obtenidas por GPS y las existentes para una estación por métodos convencionales (por ej. de la Dirección de Cartografía Nacional) no debe convertirse en práctica común para evaluar la calidad ni de una ni de otra tecnología; deben considerarse los factores que obligan a que el resultado de tal comparación sea diferente en la mayoría de los casos.

6.- La combinación de mediciones GPS con la red básica nacional parece ser la mejor alternativa para dotar al país de un control geodésico fundamental de gran calidad, fácil de mantener y de mejorar. La ubicación de una estación GPS cada cierta distancia (por ej. cada 100 Kms) puede arrojar los resultados deseados.

7.- La verdadera exactitud (externa o absoluta) de las mediciones GPS debe ser analizada detenidamente al tratar de combinar mediciones GPS con mediciones convencionales.

8.- La naturaleza y estado actual de la red geodésica de primer orden del país, debe ser objeto de mucha consideración y análisis al utilizarse como apoyo para mediciones GPS, especialmente lo referente a su uni- y bi-dimensionalidad, distribución geográfica, heterogeneidad y calidad.

9.- El problema de la falta de buenos parámetros de transformación entre el datum satelital y el convencional, así como el desconocimiento de las ondulaciones del geode con respecto al elipsoide internacional de Hayford, debe ser tomado muy en cuenta al planificar y evaluar mediciones GPS en Venezuela, constituyendo

ésto un factor limitante de la óptima utilización de esta tecnología en el país.

10.- Urge la formulación de especificaciones nacionales que regulen el procedimiento de mediciones GPS en Venezuela, así como la centralización en un banco de datos de las coordenadas obtenidas por este método, incluyendo su matriz de varianza-covarianza.

11.- Para los fines que así lo permitan, especialmente trabajos de carácter relativo, las mediciones GPS deben utilizarse en el datum y elipsoide satelital, evitando la transformación al datum nacional y la reducción de altura, de esta forma se garantiza que no se "pierde" la alta exactitud que proporciona el GPS.

Referencias

1. CATURLA, J., 1988: " SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)". Publicación Técnica No 20 del Instituto Geográfico Nacional MDPU, Madrid, 1988.
2. DREWES, REIGBER, STUBER, SUAREZ, TREMEL, HENNEBERG, HOYER, CHOURIO Y REKKEDAL, 1989: "Resultados de la Campaña GPS CASA-1 en Venezuela". 2do. Congreso Venezolano de Geodesia, Maracaibo, 1989.
3. HOYER, M., 1982 a: "SATELLITEN - DOPPLERMESSUNGEN ALS UNTERSTUTZENDE BEOBACHTUNGEN BEI DER KONTROLLE UND VERBESSERUNG EINES GEODATISCHEN NETZES IN VENEZUELA". Tesis Doctoral, Hannover, 1982.
4. HOYER, M., 1982 b: "Combinación de una red satelital Doppler con una red terrestre". Trabajo de Ascenso EIG-LUZ, Maracaibo, 1982.
5. HOYER, M., 1986 "La Transformación entre el Datum Venezolano La Canoa y el Datum Satelital WGS-72". Trabajo de Ascenso EIG-LUZ, Maracaibo, 1986.
6. HOYER, M., 1990: "Informe final de Proyecto de Investigación"; Aplicación del GPS en Venezuela para fines geodésicos y geofísicos", presentado al CONDES (LUZ), Maracaibo, Septiembre 1990.
7. HURTADO, E. Y RINCON, G., 1989: " Software para la compensación de redes geodésicas con mediciones heterogéneas". 2da. Convención Zuliana de Informática, Maracaibo, 1989.
8. IAGS, 1960: "TRIANGULACION STATISTICS FOR VENEZUELA". Publicación de Inter American Geodetic Survey, USA, 1960.
9. LEAL, J., 1989: "INTEGRACION DE GPS Y NIVELACION EN LA MEDICION DE SUBSIDENCIA EN LA COSTA ORIENTAL DEL LAGO". 2do. Congreso Venezolano de Geodesia, Maracaibo, 1989.
10. LUNAR, M., 1989: " PROBLEMATICA EN EL ANALISIS DE ESTADO ACTUAL DE LA RED GEODESICA PRIMARIA DE VENEZUELA". Alternativas y Solución. 2do. Congreso Venezolano de Geodesia, Maracaibo, 1989.
11. ROTHACHER, M., BCUTLEN, G., GURTNER, W., SCHILDKNECHT Th., 1988: "DOCUMENTATION FOR BERNESE GPS SOFTWARE VERSION 3.0". Berna, Julio 1988.
12. SEEBER GUNTER, "Satelliten Geodäsie" Walter de Gruyter, Berlín, 1989.
13. TRIMBLE NAVIGATION, 1989: "TRIMVECPUS GPS SURVEY SOFTWARE: USER'S MANUAL AND TECHNICAL REFERENCE GUIDE". CALIFORNIA, 1989.

Recibido el 29 de Julio de 1992

En forma revisada el 22 de Marzo de 1993

esto un factor limitante de la óptima utilización de esta tecnología en el país.

10.- Urge la formulación de especificaciones nacionales que regulen el procedimiento de mediciones GPS en Venezuela, así como la centralización en un banco de datos de las coordenadas obtenidas por este método, incluyendo su matriz de varianza-covarianza.

11.- Para los fines que así lo permitan, especialmente trabajos de carácter relativo, las mediciones GPS deben utilizarse en el datum y elipsoide satelital, evitando la transformación al datum nacional y la reducción de altura, de esta forma se garantiza que no se "pierde" la alta exactitud que proporciona el GPS.

Referencias

1. CATURLA, J., 1988: " SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)". Publicación Técnica No 20 del Instituto Geográfico Nacional MDPU, Madrid, 1988.
2. DREWES, REIGBER, STUBER, SUAREZ, TREMEL, HENNEBERG, HOYER, CHOURIO Y REKKEDAL, 1989: "Resultados de la Campaña GPS CASA-1 en Venezuela". 2do. Congreso Venezolano de Geodesia, Maracaibo, 1989.
3. HOYER, M., 1982 a: "SATELLITEN - DOPPLERMESSUNGEN ALS UNTERSTUTZENDE BEOBACHTUNGEN BEI DER KONTROLLE UND VERBESSERUNG EINES GEODATISCHEN NETZES IN VENEZUELA". Tesis Doctoral, Hannover, 1982.
4. HOYER, M., 1982 b: "Combinación de una red satelital Doppler con una red terrestre". Trabajo de Ascenso EIG-LUZ, Maracaibo, 1982.
5. HOYER, M., 1986 "La Transformación entre el Datum Venezolano La Canoa y el Datum Satelital WGS-72". Trabajo de Ascenso EIG-LUZ, Maracaibo, 1986.
6. HOYER, M., 1990: "Informe final de Proyecto de Investigación": Aplicación del GPS en Venezuela para fines geodésicos y geofísicos", presentado al CONDES (LUZ), Maracaibo, Septiembre 1990.
7. HURTADO, E. Y RINCON, G., 1989: " Software para la compensación de redes geodésicas con mediciones heterogéneas", 2da. Convención Zuliana de Informática, Maracaibo, 1989.
8. IAGS, 1960: "TRIANGULACION STATISTICS FOR VENEZUELA". Publicación de Inter American Geodetic Survey, USA, 1960.
9. LEAL, J., 1989: "INTEGRACION DE GPS Y NIVELACION EN LA MEDICION DE SUBSIDENCIA EN LA COSTA ORIENTAL DEL LAGO". 2do. Congreso Venezolano de Geodesia, Maracaibo, 1989.
10. LUNAR, M., 1989: " PROBLEMATICA EN EL ANALISIS DE ESTADO ACTUAL DE LA RED GEODESICA PRIMARIA DE VENEZUELA". Alternativas y Solución. 2do. Congreso Venezolano de Geodesia, Maracaibo, 1989.
11. ROTHACHER, M., BCUTLEN, G., GURTNER, W., SCHILDKNECHT Th., 1988: "DOCUMENTATION FOR BERNESE GPS SOFTWARE VERSION 3.0". Berna, Julio 1988.
12. SEEBER GUNTER, "Satelliten Geodäsie" Walter de Gruyter, Berlin, 1989.
13. TRIMBLE NAVIGATION, 1989: "TRIMVECPUS GPS SURVEY SOFTWARE: USER'S MANUAL AND TECHNICAL REFERENCE GUIDE", CALIFORNIA, 1989.

Recibido el 29 de Julio de 1992

En forma revisada el 22 de Marzo de 1993