

REDES DE ESTACIONES PERMANENTES GPS. UNA RESPUESTA AL PROBLEMA DE MATERIALIZAR EL SISTEMA DE REFERENCIA TERRESTRE

María Virginia Mackern Oberti

Keywords: Geodesia, GPS, Marcos de Referencia Terrestres

Resumen

En los últimos 20 años las técnicas geodésicas han evolucionado a un ritmo impredecible. En particular el GPS, por ser entre las técnicas modernas una de las más económica, de infraestructura mas sencilla y por consiguiente de aplicación masiva, ha superado todas las expectativas. Son usuarios de la misma geodestas dedicados a la materialización del sistema de referencia, ingenieros y topógrafos encargados de llevar adelante obras civiles, viales, emprendimientos mineros, petroleros, la empresa aeronáutica para definir rutas aéreas y aterrizajes asistidos por coordenadas, deportistas en navegación aérea, marítima y terrestre, etc.

Es quizás por la gran demanda en el soporte técnico y científico de esta gran gama de usuarios que la estructura científica que respalda dicha técnica se ha visto obligada a realizar grandes inversiones en el marco de referencia que la misma demanda.

En los orígenes del GPS el marco de referencia lo constituían las 5 estaciones de rastreo permanente que pertenecen a los dueños del sistema.

La comunidad científica motivada principalmente por estudios geodinámicos comenzó a instalar y mantener otras Estaciones Permanentes GPS (EP GPS) distribuidas globalmente cuya información pasó a ser pública a través del Internacional GPS Service, IGS. Con este ejemplo de cooperación se comenzaron a instalar redes regionales que perseguían, en algunos casos, fines científicos pero en otros sólo el objeto de brindar servicios a la comunidad de usuarios. A la fecha el IGS ha incorporado 385 Estaciones Permanentes GPS. Además existen una gran cantidad de EP GPS que no han sido incorporadas al IGS pero cuyas observaciones tienen calidad geodésica como por ejemplo EP instaladas con fines catastrales o Bases de Sistemas GPS de RTK, etc.

Esta infraestructura es cada vez mas utilizada en la materialización de sistemas de referencia terrestres, por las ventajas que representa por sobre las formas convencionales de materializar redes de puntos fijos (marcos pasivos).

En este trabajo se describen en primer lugar las características que tenía la Materialización de los Sistemas de referencia antes del desarrollo de la Geodesia Satelital. Luego se detalla la evolución de tales Marcos en Argentina y en América. En segundo lugar se describen los conceptos modernos de Materialización y densificación de los Sistemas de Referencia y cómo las redes de EP GPS surgen como una respuesta concreta a esta necesidad. Se detallan las ventajas de tales Marcos Activos por sobre los tradicionales (Marcos Pasivos).

Finalmente se muestra un caso concreto de aplicación de esta estructura Activa y algunas conclusiones y propuestas.

Abstract

Geodetic techniques have in the last 20 years evolved at an unpredictable rhythm. The GPS in particular, because amongst the modern techniques is one of the less costly, of simpler infrastructure and therefore can be massively applied, has gone beyond what was expected. Between the users dedicated to materialize the reference system there are engineers and topographers in charge of civil works and road construction, the mining and oil industries, in air navigation GPS is used to define aerial routes and landing assisted by coordinates, they are also used by sportsmen in air and maritime navigation, on land, etc. Perhaps the great demand exerted over the technical and scientific aspects of the scientific structure behind this technique by such wide range of users has forced the making of large investments in the reference frame.

At the beginning of the GPS the reference frame were five permanent tracking stations belonging to the system owners. The scientific community, mainly driven by geodynamic studies, started installing and maintaining other GPS permanent stations (GPS PS), globally distributed and which information went public through the International GPS Service, IGS. Following this cooperation example, regional networks were installed, in some cases with scientific goals but in many other cases just to afford services to the users' community. As of date the IGS has added 385 GPS permanent stations. Besides, there is a number of GPS PS that have not been incorporated to the IGS but whose observations are of geodetic quality, such as those PS installed with cadastral ends or Bases of RTK Systems, etc.

This infrastructure is more and more used in the materialization of terrestrial reference systems because of its superiority over the conventional ways to materialize fixed points nets (passive frames).

This work describes firstly the characteristics of the materialization of terrestrial reference systems before the development of Satellital Geodesy, followed by how these frames evolved in Argentina and America. The modern concepts of materialization and densification of Reference Systems are described in the second place, as well as how the GPS PS nets arise as the concrete response to this necessity. The superiority of active frames over the traditional passive frames is given in detail. Finally, this work shows an application of this active structure, some conclusions and proposals.

Los Marcos de referencia antes de la Geodesia Espacial.

Haciendo un poco de historia y retrotrayéndonos 20 años atrás o más, los marcos de referencia eran locales, ofreciendo una solución exclusivamente regional.

Con el objeto de materializar los sistemas de referencia y densificarlos, y ante la imposibilidad de ubicar con precisión geodésica el geocentro, se procedía a materializar el sistema de referencia mediante las clásicas redes de triangulación, adoptando los llamados "punto datum", lo cual dio origen a los denominados sistemas de referencia geodésicos locales.

Por ejemplo en nuestro país existían como puntos de control los puntos Laplace, en los cuales se realizaban observaciones astronómicas, gravimétricas y nivelación, con el objeto de aplicar las correcciones necesarias a las coordenadas astronómicas para transformarlas en geodésicas.

Es sabido que dichas transformaciones consideraron aproximaciones que resultaron en pérdidas de precisión que sumadas a las limitaciones del instrumental de medición angular, dieron como resultado precisiones del orden de 3 a 10 ppm. Dichas precisiones han sido notablemente superadas en la actualidad. Este es el caso del Sistema Campo Inchauspe, adoptado como sistema oficial en la República Argentina hasta 1997. **Figura N°1**

Estos marcos de referencia fueron además “bidimensionales” debido a que solo podían proveer Latitud y Longitud. La altura sobre el nivel del mar era establecida en mareógrafos y luego densificada mediante una red de nivelación, completamente independiente de la red planimétrica. La consecuencia inmediata era que los marcos de referencia de países vecinos podían diferir en cientos de metros, y la vinculación entre continentes a través de los océanos no era posible. En Argentina durante más de un siglo, se establecieron varios marcos de referencia. De ellos, el marco planimétrico más importante por su extensión y calidad fue Inchauspe 69.

En cuanto a las alturas sobre el nivel del mar, la más importante es la red nacional de nivelación de primer orden que fue terminada de medir hace pocos años. Ambas redes han sido establecidas por el Instituto Geográfico Militar en una tarea titánica que constituye un hito a nivel mundial dadas su extensión y calidad. El cuadro de situación previa al posicionamiento satelitario se completa mencionando que, además de estos dos marcos de referencia principales, permanecen aún hoy en día en uso otros, de menor calidad y extensión, establecidos por el mismo IGM o por organismos y empresas estatales en respuesta a necesidades que no podían esperar la conclusión de los trabajos de las redes principales. [Moirano, J.F.(2000)]

En cuanto a la **monumentación** de estas redes clásicas se adoptaron históricamente modelos de construcción que procuraban la permanencia en el tiempo de los puntos. La experiencia nacional e internacional es que un número importante de ellos se destruye por un sinnúmero de razones. Por otro lado el uso eficiente de un marco de referencia exige que la distancia que debe recorrerse para encontrar un punto desde el que se adquiere el sistema de referencia, sea corta. Esto ha llevado a que los usuarios soliciten densificaciones de las redes principales y en consecuencia a una cada día mayor dificultad para asegurar el mantenimiento de las mismas. Es decir para el mantenimiento físico se debería contar con un programa permanente de visitas para verificar que los monumentos no han sido destruidos, [Usandivaras, J.C. y A. Mesa (2004)], cosa que no se cumple por la falta de presupuesto adecuado.

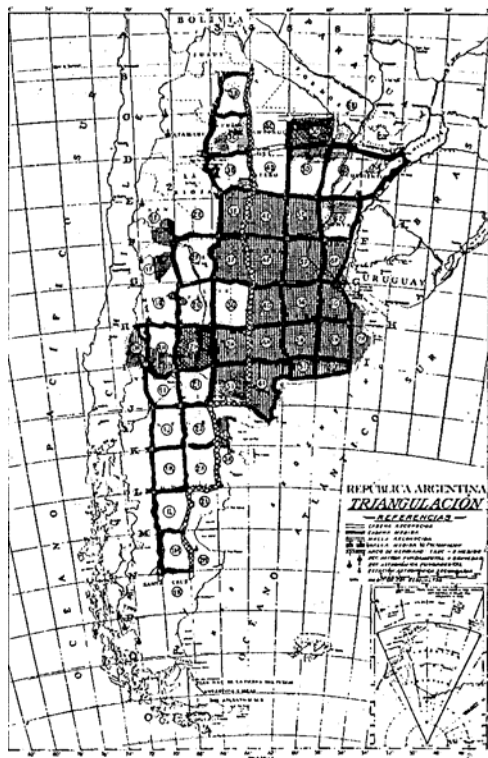


Fig. 1 Red de triangulación del IGM-CAI69

Evolución de los marcos de referencia en América y en Argentina

La materialización tradicional se ha conservado en muchas de las realizaciones de los marcos de referencia modernos como ser: SIRGAS, POSGAR, etc. La diferencia con las redes clásicas versa en que las mismas han sido medidas con GPS, por lo tanto materializan sistemas geocéntricos.

El Sistema POSGAR'94.

La llegada del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y sus ventajas indudables alertaron a los geodestas acerca de la necesidad de disponer de un marco de referencia básico, compatible con las precisiones de la nueva tecnología y que fuese lo más cercano posible al sistema global WGS84.

Era evidente que someter las mediciones GPS al marco Inchauspe (Sistema geodésico local, oficial hasta 1997) involucraba una degradación de la precisión de las nuevas mediciones satelitarias y en consecuencia era imprescindible disponer de una nueva red que cubriese la totalidad del país.

En 1993 las provincias argentinas necesitaban coordenadas de arranque en el sistema WGS84 y también un mejor marco de referencia que el brindado por el sistema clásico CAI69. Esto era necesario a fin de proveer un control adecuado para las nuevas redes geodésicas provinciales, a ser establecidas en el marco del "Programa de Desarrollo Económico y Saneamiento Financiero de las Provincias Argentinas". Con este objetivo, se estableció una red geodésica a partir de mediciones GPS con una precisión relativa de 1 ppm que materializó el sistema de referencia WGS84.

Como resultado surgió POSGAR'94, que consta de 127 puntos bien distribuidos en el territorio nacional a razón de aproximadamente un punto cada doscientos kilómetros tanto en latitud cuanto en longitud (Figura N°2). Las coordenadas finales se encuentran en el sistema WGS84 y fueron distribuidas por el IGM en 1995. [Moirano, J. (2003)]

Para la materialización de los puntos se apeló al recurso de utilizar las estaciones de la red Inchauspe que tuvieran un acceso fácil y su estabilidad fuera presuntamente confiable. Esta posibilidad la brindaban las estaciones astronómicas (puntos Laplace) y los extremos de bases invar, lo que se cumplió mayoritariamente. La ubicación de los puntos en coincidencia con la red Inchauspe brindaba la posibilidad adicional de poder determinar los parámetros de transformación entre el nuevo sistema y el que le precedió.

El cálculo y la compensación de la red fueron ejecutados por el Observatorio Astronómico de La Plata.

El sistema de referencia se introdujo mediante la inclusión de las coordenadas de 20 puntos con alto peso. Los cuales fueron:

- La estación EARG, con coordenadas provenientes de una vinculación entre el punto ocupado en POSGAR y la baliza DORIS que allí opera.



**Figura N°2. Red POSGAR
[IGM, 2002].**

- Las coordenadas de 19 puntos de la red CAP transformadas a WGS84, obtenidas a través de una comunicación personal con Robert Smalley de la Universidad de Memphis.

Los errores de las coordenadas finales se encuentran en un 80% de los casos por debajo de los 30 cm con un nivel de confianza del 95 %.

El Instituto Geográfico Militar dio a conocer las coordenadas de la red en 1995 bajo el nombre de POSGAR'94 y el 9 mayo de 1997 lo definió como marco de referencia geodésico nacional. [IGM, 1997].

Impacto de POSGAR'94

Los proyectos recientes Provincias I (Programa de Saneamiento Financiero y Desarrollo Económico de las Provincias Argentinas) y PASMA (Proyecto de Asistencia Técnica para el Desarrollo del Sector Minero Argentino) son los ejemplos más representativos de aplicación del nuevo marco de referencia. Para ambos casos POSGAR'94 ofrece un marco único y confiable para el desarrollo de tales redes de densificación, que abarcaron la totalidad de las provincias argentinas.

Otro caso significativo es la contribución a la unificación de los sistemas de coordenadas en las áreas fronterizas, dado que POSGAR y SIRGAS (con extensión continental) serán de aplicación prácticamente indistinta.

Una ventaja adicional futura de POSGAR'94 será la de que frente a una evolución hacia POSGAR'98 (u otro) la transformación será simple y mínima pues se tratará de sistemas concéntricos y con el mismo elipsoide de referencia.

Otros Marcos de referencia existentes en la Región

Proyecto de Apoyo al Sector Minero Argentino (PASMA)

El Programa de Asistencia al Sector Minero Argentino (PASMA) financiado por el Banco Mundial y auspiciado por el Programa Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), tuvo por objeto la organización y modernización de las instituciones públicas mineras y su marco técnico-legal, definiendo el Sistema Nacional de Catastro y Registro Minero.

Uno de sus componentes estuvo dirigido a mejorar sensiblemente la seguridad jurídica de los inversores, a través de la definición técnica y legal de un conjunto de actividades que permitieran obtener un Catastro Minero moderno y eficiente.

El fin perseguido por dicho Catastro fue asegurar un sistema de información, capaz de mantenerse actualizado en el tiempo y brindar seguridad jurídica, en el trámite de la concesión minera.

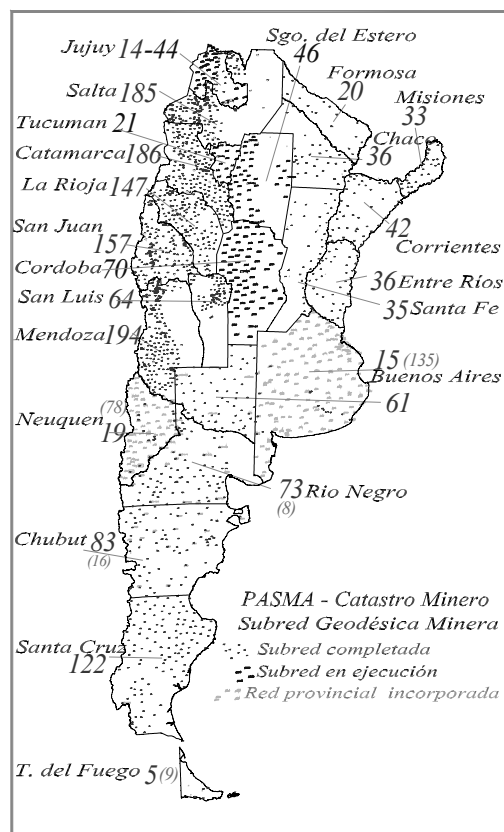


Fig.3. Subred Geodésica minera.

Para poder establecer un marco geodésico adecuado, se acordaron, diseñaron y fijaron las especificaciones técnicas de un nuevo marco geodésico nacional para la referenciación de los pedimentos mineros en el país, respetando las normas y estándares del IGM. Cumplido este paso fundamental se llamó a un concurso internacional para la ejecución de una red geodésica y la reposición de los esquineros de las minas existentes en las distintas provincias. Se subdividió al país en distintas zonas con el objeto de licitar los trabajos e ir evaluando los resultados parcialmente, lo que dio lugar a que trabajaran en este programa distintas empresas nacionales e internacionales.

La red GPS minera que surgió de este proyecto es posiblemente la mayor inversión en infraestructura geodésica básica realizada por el país en las últimas décadas, la misma se encuentra subdividida en distintas subredes por zonas (Figura N°3)

Esta red básica es mas precisa que POSGAR94 debido a la metodología de medición y procesamiento empleados. Esto permite auditar la precisión de la posición relativa de los vértices del marco oficial del país.

El Proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas)

El proyecto SIRGAS fue iniciado en la Conferencia Internacional para la Definición de un Datum Sud Americano Geocéntrico, realizada desde el 4 al 7 de octubre de 1993 en Asunción, Paraguay.

Los objetivos establecidos para el proyecto fueron los siguientes:

- Definir un sistema de referencia para América del Sur.
- Establecer y mantener una red de referencia y
- Definir y establecer un datum geocéntrico.

Las actividades del proyecto SIRGAS se abocaron a desarrollar una red de referencia continental con una precisión y exactitud compatibles con las técnicas de posicionamiento modernas, principalmente aquellas asociadas con GPS. Considerando el aumento en la utilización del GPS, se decidió que sería ínfimo el malgaste de recursos para vincular las nuevas mediciones a la estructura geodésica existente, la cual se basa en métodos de medición clásicos (triangulación, poligonación, trilateración, etc.) y en los cuales la precisión es por lo menos 10 veces peor que la obtenida fácilmente con GPS. Además la coexistencia de una gran cantidad de sistemas geodésicos clásicos definidos por los países Sud Americanos generaría problemas como por ejemplo en la definición de límites internacionales. La adopción del ITRF (Internacional Terrestrial Reference Frame) como sistema de referencia común garantizó la homogeneidad de los resultados dentro del continente y permitió la consistente integración de la red SIRGAS con las redes de otros continentes, lo cual contribuye al desarrollo de la geodesia global.

El Grupo de Trabajo I fue responsable de establecer el Sistema de Referencia. Con este propósito se organizó una campaña GPS, llevada a cabo desde el 26 de Mayo al 4 de Junio de 1995. (fig.N°4)

Las observaciones de SIRGAS fueron procesadas y ajustadas por dos centros de cálculo en forma independiente, una fue el



Figura N°4- Red SIRGAS.
[SIRGAS, 1995]

DGFI en Alemania y otra NIMA en Estados Unidos, ambos centros presentaron sus resultados y finalmente fueron combinados con el objeto de obtener una solución única final. Los detalles respecto al cálculo de cada uno de los grupos se encuentra en [SIRGAS, 1995].

Velocidades de las estaciones a partir de la repetición de observaciones.

Las estaciones del IGS, incluidas en la red SIRGAS están equipadas con receptores GPS operando permanentemente. Los grupos de datos de observación son rutinariamente evaluados y proveen de coordenadas de las estaciones semanalmente.

El DGFI es uno de los 6 centros de análisis asociados de redes regionales (RNAAC) que opera con las observaciones de América del Sur, procesando todos los datos disponibles desde las estaciones permanentes de observación en la región. Estos resultados son luego combinados con todos los de los demás centros de análisis para obtener la solución global. De esta forma se cuenta con coordenadas semanales para todas las estaciones permanentes de SIRGAS en ITRF y con las cuales se pueden calcular las velocidades de tales estaciones. Se ha recomendado instalar tantos receptores GPS permanentes como sea posible en los sitios SIRGAS.

Para calcular las velocidades de las estaciones no equipadas con receptores permanentes, se necesitaría repetir mediciones en el tiempo "t_i", de tal manera de calcular nuevas coordenadas de las estaciones. La variación de las coordenadas dividida por el intervalo de tiempo entre observaciones sucesivas permitiría calcular las velocidades de cada estación.

$$\underline{\Delta X} (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = \underline{X} (t_i) - \underline{X} (t_0) ; \quad \underline{V} = \underline{\Delta X} / \Delta t ; \quad \underline{V} (V_x, V_y, V_z)$$

Para mejorar la precisión en la estimación de velocidades, el intervalo de tiempo entre las distintas campañas GPS no debe ser muy corto, se recomienda no menor a 5 años.

Es por esto que en el año 2000, se realizó una segunda campaña SIRGAS, de la cual fueron calculadas las coordenadas y surgieron las primeras velocidades de muchos sitios.

Datum Geocéntrico.

La misión del G.T II fue designar y establecer a través del Datum geocéntrico la densificación de la red SIRGAS y la red Geodésica de cada país participante.

Se determinó que deberían considerarse para el datum geocéntrico los ejes de coordenadas basados en el sistema de referencia SIRGAS y los parámetros del elipsoide de referencia geodésico (GRS) de 1980. También se estableció que el sistema de referencia SIRGAS estaría basado en ITRF.

Se realizó un diagnóstico de la situación específica de cada país miembro, detectando situaciones muy diferentes. Finalmente en agosto de 1996, se concluyó que el desarrollo de la integración de las redes geodésicas de cada país sería individualmente implementado bajo las recomendaciones técnicas y la coordinación del G.T. II.

A continuación se describe la situación de Argentina en lo que respecta a su integración con SIRGAS.

Integración de la red geodésica Argentina POSGAR al sistema SIRGAS.

Un nuevo cálculo de la totalidad de la red POSGAR se realizó entre 1996 y 1999, siguiendo las recomendaciones del G.T. II de SIRGAS. Tal realización lleva el nombre de POSGAR98.

El sistema de referencia que materializa POSGAR'98 es el ITRS. Se accede a él a través de las coordenadas del marco de referencia SIRGAS'95, que a su vez densifica al marco ITRF94 en América del Sur. Las coordenadas se encuentran referidas a la época 1995.4. Esta elección respetó lo acordado con el resto de los países sudamericanos en SIRGAS, con el fin de garantizar la compatibilidad de los marcos de referencia de los países de la región. Se utilizaron para la vinculación la totalidad de los puntos SIRGAS en territorio argentino a los que se sumó la estación IGS, SANT (Chile).

Se encuentra en análisis la forma en que va a ser mantenida o mejorada la calidad de tal marco de referencia. Esto es necesario si se desea mantener una precisión y exactitud respecto de ITRS/SIRGAS del orden de pocos centímetros ya que estos valores se encuentran en el orden de magnitud de las deformaciones y desplazamientos de la corteza terrestre acumulados a lo largo de menos de una década.

La Materialización de los sistemas hoy

La materialización de los sistemas de referencia consiste en aplicar un determinado modelado para obtener las posiciones y el movimiento de un cierto número de puntos que definen el Marco de Referencia Convencional (MRC). Por lo tanto la materialización se basa en un conjunto de puntos donde sus coordenadas en función del tiempo se definen para cada instante en el Sistema de Referencia Convencional a partir de observaciones. Los ejes cartesianos espaciales convencionales que definen el marco de referencia están implícitos en las coordenadas de sus vértices.

El sistema y su marco coinciden sólo en la época inicial.

A un determinado marco geodésico terrestre le corresponden un conjunto de coordenadas de estación que llamaremos "grupo de coordenadas". Cada grupo de coordenadas se caracteriza por:

- a) La técnica de medición utilizada para determinarlas, como VLBI, Telemetría Láser sobre la Luna (LLR) o sobre satélites (SLR), GPS, etc.
- b) El modelo aplicado por el centro de análisis para el cálculo de las mismas.
- c) Su desviación típica.
- d) Las velocidades de desplazamiento de las estaciones y sus desviaciones típicas.
- e) La época de referencia de las coordenadas y la época de medición.
- f) Las matrices de correlación de los parámetros estimados.
- g) El conjunto de estaciones elegido para materializar el sistema y los criterios de selección.

El ITRS es hoy el sistema de referencia terrestre global materializado con mayor precisión y exactitud. Define el geocentro con un error estimado en 10 cm mientras que la precisión de las coordenadas que conforman el marco de referencia son del orden de un centímetro [Boucher *et al.*, 1999]. Está conformado por un conjunto de estaciones distribuidas en todo el mundo en las que se realizan observaciones mediante al menos una de las técnicas VLBI, SLR, GPS o DORIS. Las materializaciones del ITRS, llamadas genéricamente ITRF o marco de referencia terrestre internacional constan de un catálogo de estaciones con coordenadas y velocidades a las que se asocia una época de referencia.

Debido a que las coordenadas de cualquier sitio específico evolucionan en el tiempo, el marco de coordenadas debe mantenerse. Cada año las agencias que calculan soluciones globales, presentan un grupo de coordenadas de las estaciones al International Earth Rotation Service, IERS, quien combina las soluciones para calcular dos productos: la realización anual del ITRF y su campo de velocidades asociado, en una época específica.

Estas soluciones anuales de ITRF son desarrolladas y publicadas en reportes anuales y notas técnicas.

En estos marcos de referencia, la posición de un punto y su evolución sobre la superficie terrestre se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0 \cdot (t - t_0) + \sum_i \vec{X}_i(t) \quad (1)$$

donde el cero indica la época de definición del marco de referencia, V indica la velocidad del punto debida a los movimientos tectónicos y la suma al final de la expresión agrupa varios efectos variables en el tiempo que modifican la posición del punto como ser las mareas terrestres, efectos de la carga oceánica, levantamientos post-glaciales, carga atmosférica y en general cualquier fenómeno modelable que implique movimientos de las estaciones mayores que unos pocos milímetros.

Las materializaciones del ITRS producidas por el IERS se llaman ITRFYY donde YY indica el año de los datos mas recientemente incorporados al cálculo. La época de referencia del marco, que se indica en la expresión (1) con el subíndice "0", se agrega aparte; siendo ITRFYY solamente el nombre del marco de referencia. Las características de cada marco terrestre producido por el IERS se indican en la serie IERS Technical Notes. Los estándares o convenciones que definen los sistemas de referencia del IERS se publican como IERS Conventions y sufren actualizaciones cada varios años.

Uno de los marcos de las series anuales ITRF es por ejemplo ITRF93, con coordenadas dadas en la época 1993,0.

Se realizan mejoramientos anuales de ITRF del orden del cm en las posiciones y algunos mm por año en velocidades, con un incremento gradual en el número de estaciones que la definen (principalmente de estaciones GPS).

Cooperación Internacional para establecer el sistema de referencia global.

La definición de sistemas de referencia convencionales globales exige un esfuerzo de cooperación científica Internacional, tarea en que la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) y la Unión Astronómica Internacional (IAU) han adquirido experiencia durante todo el siglo XX como se detalla a continuación.

En el año 1988, se discontinuaron las actividades de los servicios del BIH, IPMS e ILS y se concentraron todas las actividades en el IERS que en adelante fue el encargado de la determinación de los parámetros de rotación terrestres: Movimiento del polo, UT1 y correcciones a los modelos de nutación y precesión sobre la base de observaciones VLBI, LLR y SLR, a las que mas tarde se agregarían GPS y DORIS. Este servicio fue encargado también de la definición de los sistemas de referencia celestes y terrestres convencionales así como también de su materialización.

Densificación del marco de referencia convencional

El número de puntos que constituye un determinado Marco de Referencia Convencional (MRC) puede no ser suficiente para todas las aplicaciones prácticas por lo tanto surge la densificación de este marco como una quinta etapa. Esta etapa

suplementaria en la construcción de un sistema de referencia, permite hacer el MRC, más accesible al usuario. La densificación del marco se realiza progresivamente, cuando una necesidad de georreferenciación se hace sentir en una zona.

En esta etapa se recomienda utilizar todos los parámetros establecidos en el sistema de referencia convencional. Sin embargo, según sea el fin de la densificación, pueden tolerarse condiciones menos restrictivas sobre la exactitud de las coordenadas de los nuevos puntos, y en algunos casos, en favor de lograr un mayor número de ellos. En esta etapa se produce la integración de la Geodesia con la Agrimensura.

Redes de estaciones GPS permanente, el futuro de los marcos de referencia

Existe la tendencia cada día mas marcada de reemplazar la materialización tradicional por estaciones permanentes GPS. Una estación permanente está materializada por un receptor GPS instalado en una posición conocida y tiene la capacidad de conservar observaciones que serán utilizadas en la determinación de la posición relativa de nuevos puntos.

Hoy una estación permanente brinda un servicio en forma continua independientemente de la existencia de un usuario en un momento dado.

Para que una estación permanente cumpla con su objetivo son necesarias las siguientes condiciones operativas:

- El usuario debe tener la certeza de que podrá contar con los datos que necesite cualquiera sea el período de datos que requiera.
- El intervalo de medición debe ser compatible con el que necesita para su trabajo un usuario.
- El acceso a los datos debe poder obtenerse tan pronto como se necesite.
- El formato en que se entregan los datos debe hacer posible que el usuario utilice sus programas habituales de cálculo.

Un cierto número de estaciones permanentes integradas constituye una red. El paso fundamental de la integración consiste en el cálculo periódico conjunto de las posiciones de todas las estaciones. Este cálculo lleva con el tiempo al conocimiento de las coordenadas y de las velocidades de las estaciones con respecto a un marco fijado y a una fecha determinada.

Existen dos posibilidades para establecer un sistema geodésico nacional de referencia materializado por estaciones permanentes: un sistema centralizado como el establecido en Rep. Dominicana y Brasil o un sistema federativo como el existente en Francia y como se está desarrollando en Argentina. [J.C. Usandivaras, A. Mesa, 2004].

Algunos proyectos que materializan el ITRS en América.

SIRGAS 2000

Como ya se mencionó, se realizó una segunda campaña en el año 2000, pero en este caso se sumaron, América del Norte y Centro América a partir de todas las EP GPS existentes y otros puntos complementarios también.

A partir de esta experiencia se recomendó que el proyecto orientase sus esfuerzos a mejorar la infraestructura de las EP GPS en lugar de repetir las campañas de medición.

Actividades Geodinámicas Sud Americanas (SAGA)

Siendo que el oeste de América del Sur es técnicamente un área de gran actividad geodinámica, el proyecto SAGA pretende investigar, mediante una importante red geodésica de control, la naturaleza de las deformaciones a lo largo de la zona de subducción andina, incluyendo variaciones temporales y espaciales.

Con este objeto se ha establecido una red de estaciones GPS conformada por 215 sitios que cubren todo Chile y parte del oeste argentino (Figura N°5)

Las observaciones planificadas y realizadas consisten en incluir mediciones repetitivas de los puntos a modo de campaña en algunas zonas y algunas estaciones permanentes GPS localizadas en Antofagasta, Puerto Montt, Concepción, Isla Robinson Crusoe, Salta, La Plata, Río Grande y Córdoba.

La determinación de las deformaciones de campo se complementa con estudios neotectónicos y paleosismológicos en diferentes escalas espacial y temporal.

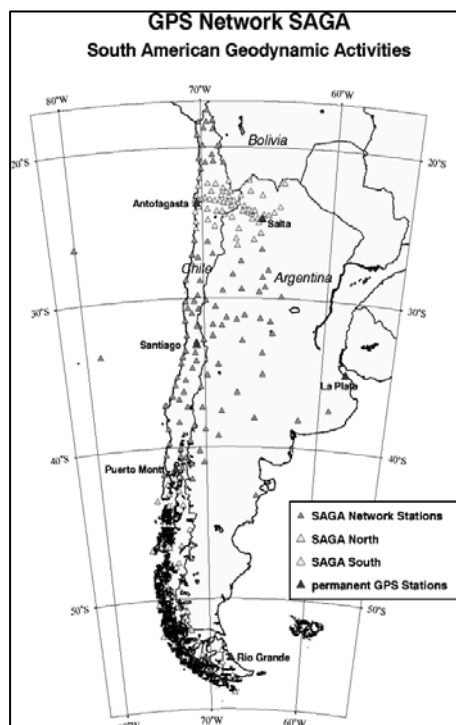


Figura N°5-Red SAGA

Proyecto Andes Centrales (CAP)

Se trata también de un proyecto Geodinámico, desarrollado por la Universidad de Memphis y la Universidad de Hawaii, en la zona oeste del continente americano. En la República Argentina colabora en el mismo el Instituto Geográfico Militar, a través de la red de estaciones permanentes GPS, RAMSAC.

Al igual que el proyecto SAGA, el Proyecto Andes Centrales persigue investigar, mediante una importante red geodésica de control, las deformaciones a lo largo de la zona de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sud Americana. Tal deformación es detectada y cuantificada a través de mediciones realizadas con GPS determinando la posición con gran precisión (del orden del mm) de estaciones geodésicas.

El objeto es determinar el cambio relativo de sus posiciones, expresado en mm/año.

Con este objeto se ha establecido una red de estaciones GPS conformada por una creciente cantidad de sitios que cubren principalmente la zona de los Andes y algunos sitios ubicados hacia el interior del continente, lejanos a la zona de

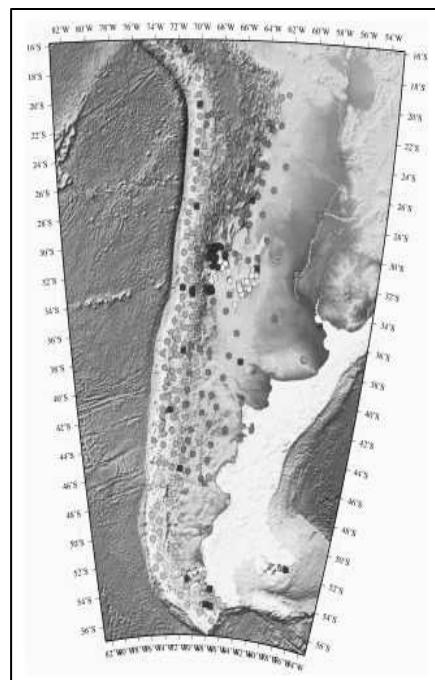


Figura N°6-Proyecto CAP

deformación entre placas (Figura N°6).

Red de Estaciones Permanentes GPS en Argentina

Durante los últimos años, se han establecido en el país más de una decena de estaciones de rastreo permanente GPS, como se muestra en la Figura N°7. Muchas de ellas cumplen con la mayoría de los estándares requeridos para integrar la red de estaciones del ITRF. En la actualidad, las observaciones de un grupo de estas estaciones son rutinariamente procesadas en el DGFI para contribuir al ITRF. Nuestro país cuenta ya con recursos humanos capaces de manejar el problema de los sistemas de referencia modernos. Se requiere un plan estratégico y los recursos adecuados para reemplazar el actual marco de referencia POSGAR por uno nuevo, basado en estaciones permanentes multipropósito. Esto permitirá contar con un marco de referencia nacional adecuado a las máximas exigencias de exactitud que las técnicas actuales permiten, y a la vez minimizar los costos de instalación, operación y por sobre todo el mantenimiento del mismo.

A continuación se describen comparativamente las ventajas del marco de referencia establecido por EP GPS con respecto a los clásicos marcos pasivos

Marcos Pasivos y Marcos Activos

Podríamos definir como marcos pasivos aquellas redes de puntos amojonados, que tienen coordenadas en el marco correspondiente y que con el objeto de su mantenimiento son protegidos físicamente y remedidos periódicamente de manera de asegurar las precisiones del mismo. Son los casos de la red POSGAR, Pasma, ya mencionados y las redes catastrales provinciales.

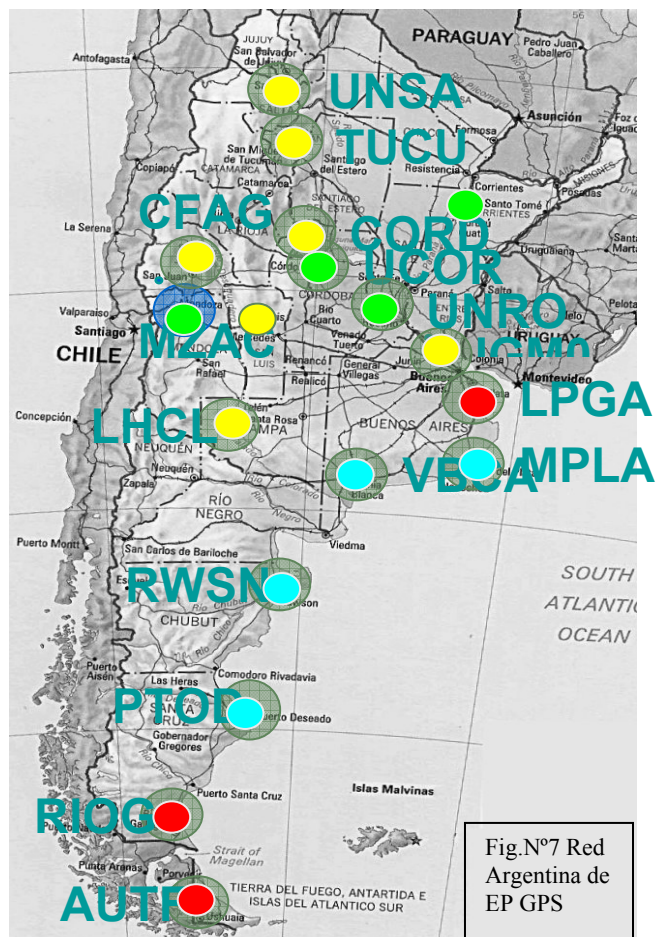
Por otro lado los marcos activos en cambio son aquellas redes de puntos que no sólo sirven de arranque o control por tener coordenadas conocidas sino que poseen una EP GPS que realiza observaciones permanentemente. Tales observaciones pueden ser luego, por diversas formas, adquiridas por un usuario de GPS cualquiera, que pretenda utilizarla como punto de referencia en su procesamiento.

Si analizamos los requerimientos para la materialización del sistema de referencia (Homogeneidad, Accesibilidad y Seguridad) y comparamos ambos tipos de marcos podemos señalar en ellos otras diferencias significativas.

Si analizamos los requerimientos para la materialización del sistema de referencia (Homogeneidad, Accesibilidad y Seguridad) y comparamos ambos tipos de marcos podemos señalar en ellos otras diferencias significativas.

Homogeneidad

Si bien algunos marcos clásicos han sido calculados en una época determinada, adoptando un elipsoide específico y un punto datum, lo cual ha quedado documentado en información considerada ya histórica. En algunos sus coordenadas han sido



calculadas y publicadas pero se desconocen los parámetros adoptados o bien hay casos en los cuales han sido calculados ajustes de redes topogeodésicas sin documentar precisiones, ni marco de referencia (puntos de control elegidos), lo cual hace perder parte de este requerimiento.

Los Marcos Activos en cambio resultan de distintas soluciones en el tiempo, realizadas con el fin de asegurar su mantenimiento matemático, y si bien generan distintas coordenadas para un mismo punto c/u de los mismos se encuentra en un marco específico, permitiendo de esa forma verificar la homogeneidad de los datos a utilizar al momento de adoptar coordenadas de uno u otro marco.

Accesibilidad.

Los marcos pasivos constituidos antes de la aparición de la tecnología GPS, con las técnicas ópticas convencionales, no reúnen la condición de accesibilidad, ya que en la mayoría de los casos prevalecía en la elección del punto la intervisibilidad, cumpliendo rara vez con la condición de fácil acceso.

A partir de la década del 90 mediante la aplicación del GPS, las nuevas redes geodésicas han podido cumplir esta condición.

En lo que hace a los Marcos Activos podemos considerar una Accesibilidad incomparable ya que a los puntos que conforman las redes de EP GPS, no es necesario ni siquiera acceder físicamente, ya que las observaciones de las mismas pueden obtenerse desde gabinete con el sólo acceso a Internet en sitios específicos.

Seguridad

Con el objeto de asegurar el mantenimiento del marco de referencia, deben cumplirse dos condiciones:

- Que se mantenga la monumentación física del punto en el terreno.
- Que las coordenadas del punto representen su posición en el Sistema de Referencia Terrestre. Siendo que los puntos no son fijos sino que sufren movimientos relativos y absolutos, el marco de referencia debe irse actualizando con mediciones periódicas y recálculo de las coordenadas, de manera que el marco represente posiciones reales de puntos en el ITRS.

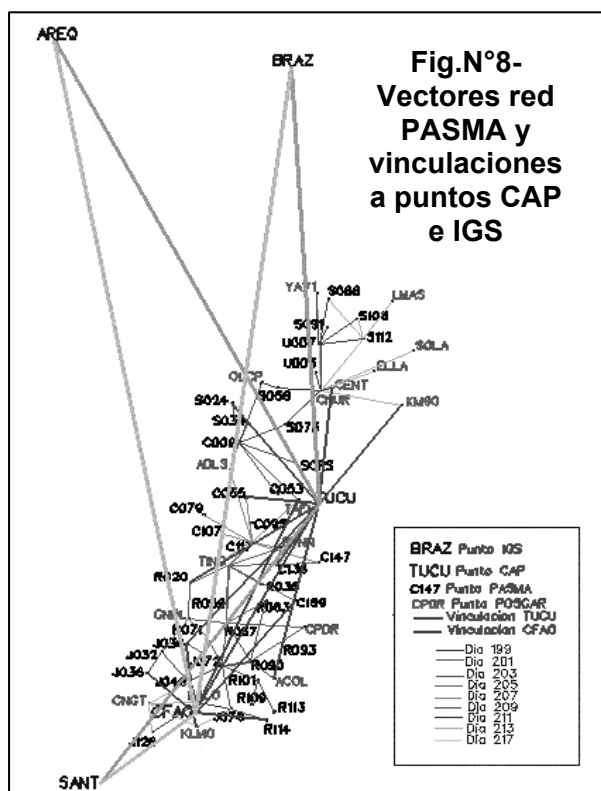
Si consideramos los Marcos Pasivos este aspecto requiere que la red de puntos se mantenga a partir de un programa permanente de visitas para verificar la existencia y estado de los monumentos, en casos de ser necesario su reposición y/o reparación. Para asegurar el mantenimiento matemático se deberían realizar campañas de remediación periódicas que permitan conocer su movimiento dentro del sistema, lo cual por lo general por su alto costo, no se lleva a la práctica.

Los Marcos Activos, o redes de EP GPS, en cambio, están respaldadas por ciertas instituciones locales que actúan como responsables de su mantenimiento físico, que en este caso no sólo constituye en la materialización física del mismo sino en asegurar el correcto funcionamiento del receptor GPS, de su correspondiente antena y del sistema de bajada y transferencia de datos a una red pública. Cabe mencionar que todo esto resulta menos costoso que las campañas clásicas de mantenimiento y reposición, antes mencionadas. En cuanto al mantenimiento matemático del marco se realiza a partir del cálculo periódico de coordenadas y velocidades, lo cual manteniendo la estructura de un centro de cálculo regional resulta como productos del mismo.

Por todo lo antes mencionado es claro apreciar las razones que nos llevan a reemplazar los marcos clásicos por este tipo de marcos Activos.

Un caso de aplicación: integración de una red geodésica a POSGAR 98, a través de la utilización de EP GPS.

La red en cuestión fue medida entre los meses de julio y agosto de 1997 por la Unión Transitoria de Empresas Esteio-IFTA, en el marco del PASMA (figura N°8). Consta de 65 puntos que conforman líneas de base de entre 60 y 120 km. Se midió utilizando seis receptores GPS simultáneos, todos de doble frecuencia y código P. Las sesiones de observación tuvieron una duración de entre 10 y 12 horas cada una. Fue procesada en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, utilizando el *software* científico Geonap [Gillone and Brunini, 1999]. Esta red fue ajustada al marco POSGAR 98, pero cumpliendo con las exigencias del pliego de licitación elaborado por las autoridades del PASMA, las coordenadas finales fueron transformadas al marco POSGAR 94, desaprovechando la calidad



intrínseca de las mediciones GPS. Frente a la hipótesis de que, por sus características de medición, la red en cuestión tenía mejor precisión que POSGAR 94, se encaró un reprocesamiento tratando de mejorar sus debilidades, mediante dos emprendimientos que no requirieron la realización de tareas de campo adicionales: lograr un diseño más rígido mediante la incorporación de cinco estaciones permanentes; y vincular la red al ITRF, obteniendo un control riguroso sobre la calidad de las coordenadas resultantes. El primer emprendimiento se llevó a cabo agregando observaciones de tres estaciones permanentes del IGS y dos estaciones permanentes de la Red Argentina de Monitoreo Satelitario Continuo (RAMSAC), todas ellas operativas en la región durante la época de las campañas PASMA (figura N°8). Estas observaciones permitieron sumar cinco líneas de base independientes en cada sesión de observación.

La incorporación de las estaciones permanentes del IGS, SANT (Santiago de Chile), AREQ (Arequipa) y BRAS (Brasilia), permitió la vinculación de la red a marcos de referencia modernos muy precisos, tales como los ITRF 94 y 97.

Este procesamiento de las observaciones GPS se realizó con el *software* científico Bernese [Beutler et al., 2000], modelando rigurosamente los distintos factores que inciden en la precisión de las coordenadas calculadas, por ejemplo, correcciones por las variaciones del centro de fase de las antenas, corrección minuciosa de ciclos perdidos, estimación de parámetros troposféricos, etc. Como resultado final de esta etapa se obtuvo una red libre, esto es, una red en la que no se introdujeron coordenadas de control, dejando que el marco de referencia quedara definido solamente a través de las efemérides satelitales. La Tabla 1 presenta una estimación realista de la precisión de las coordenadas basada en su repetitividad a lo largo de distintas sesiones de medición.

Horizontal		Vertical
Desvío estándar	±3 mm	±4 mm
Desvío máximo	11 mm	15 mm

Tabla 1. Precisión de las coordenadas.

Resultados

Luego de evaluar la precisión de la red libre se realizaron distintos ajustes ponderados con el objeto de definir el marco de referencia y evaluar la precisión de las coordenadas resultantes. Para la introducción del marco de referencia se tuvieron en cuenta las correcciones a las coordenadas de los puntos de control para llevarlas desde la época del marco de referencia a la época de las observaciones. En este cálculo se consideraron las velocidades del modelo NUVEL 1 A [De Mets et al., 1994] para los puntos POSGAR y las correspondientes geodésicas ITRF 94 ó ITRF 97 [Boucher et al., 1999] para los puntos IGS. En esta etapa se consideraron las siguientes alternativas:

- ITRF 94, definido a través de AREQ, SANT y BRAS. La ventaja de esta opción consistió en que es el mismo marco al que se vinculó la red POSGAR 98. Su desventaja fue la época de referencia (1993.0), muy distante de la época de la campaña PASMA (1997.6). Las coordenadas de control quedarían afectadas por los errores de las velocidades, mayores que ± 2 mm/año, multiplicados por los 4.6 años que median entre las dos épocas. Además sólo AREQ y SANT poseían velocidades geodésicas ITRF 94, siendo necesario utilizar el modelo NUVEL 1 A para estimar las velocidades de BRAS.
- ITRF 97 definido a través de AREQ, SANT y BRAS. Se consideró esta opción ya que sus coordenadas han sido definidas para la época de referencia 1997.0, casi coincidente con la de la campaña PASMA. Además de ello, los tres puntos poseían velocidades geodésicas en este marco de referencia.
- POSGAR 98 definido a través de 20 puntos distribuidos en la región de la red. Si bien las coordenadas están referidas al marco ITRF 94, su precisión es algo menor. Además de ello, sólo se contó con velocidades estimadas utilizando el modelo NUVEL. El interés para utilizar este marco se fundó en la hipótesis de que una mejor distribución y una mayor cantidad de puntos de control podrían redundar en una mejor solución.
- POSGAR 94. Se consideró esta opción por tratarse del actual marco de referencia oficial del país y porque permitiría, además, evaluar las mejoras debidas al uso de otros marcos de referencia.

La figura N°9 presenta una estimación realista de la precisión de las coordenadas obtenidas luego de vincular la red a los distintos marcos de referencia considerados. Como indicadores de precisión se utilizaron los desvíos de las coordenadas horizontales y vertical, luego de una transformación de similaridad de siete parámetros entre cada uno de los ajustes y la red libre. La figura N°9 muestra el desvío estándar y el desvío máximo (en valor absoluto) para las componentes horizontales y vertical de las coordenadas.

Se puede apreciar que la precisión mejora sensiblemente cuando se utilizan los marcos de referencia POSGAR 98, ITRF 94 ó 97. Vale la pena notar, sin embargo, que la densidad de puntos que materia-lizan dichos marcos es muy reducida, lo cual nos llevó a evaluar la posibilidad de adoptar POSGAR 98 como control geodésico, obtenien-do también en este caso resultados muy satisfactorios. Estos resultados demuestran, una vez más, la conveniencia de adoptar definitivamente POSGAR 98 como control geodésico para todo levantamiento preciso, particularmente cuando la coordenada vertical reviste interés.

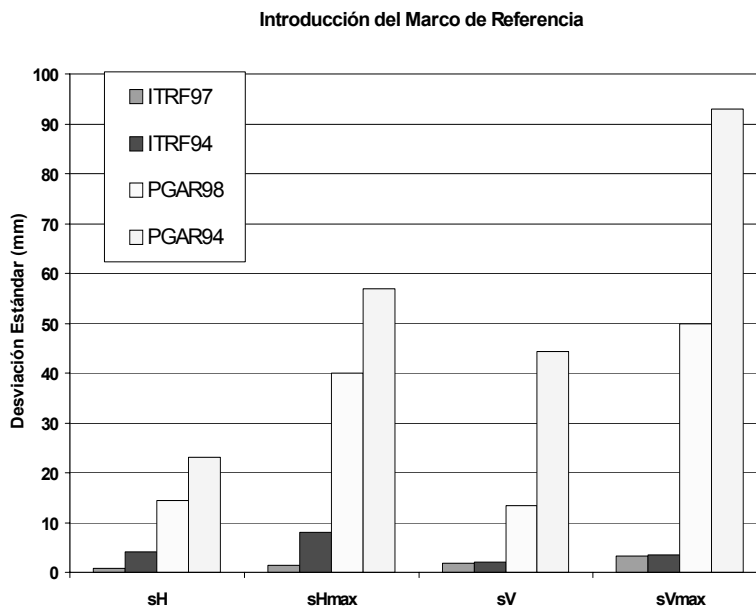


Figura N°9- Comparación de la precisión de la red al fijar distintos marcos de referencia

Conclusiones.

Las observaciones de las estaciones permanentes operativas durante las campañas de medición contribuyen a mejorar la redundancia de la red, lo que se traduce principalmente en una estimación de errores más realista, y posibilitan controles muy rigurosos gracias a la vinculación con algún marco de referencia de exactitud superior. El cálculo preciso de las largas líneas de base (miles de kilómetros) que conectan a la red con las estaciones permanentes del IGS es totalmente factible con la solo condición de utilizar un software apropiado y poseer la experiencia de procesamiento adecuada.

Se ha mostrado en forma cuantitativa, y a través de un ejemplo concreto, las mejoras que pueden alcanzarse en la precisión y en la exactitud de una red geodésica mediante la incorporación en el cálculo de EP GPS, sin requerir trabajos de campo adicionales.

Referencias

- Beutler G., E. Brockmann, S.Frankhauser, W.Gurtner, J.Johnson, L.Mervat, M. Rothacher, S.Shaer, T.Springer, R.Weber, Bernese GPS Software Version 4.2. Astronomical Institute. University of Berne, 2000
- Boucher C., Z. Altamimi, P. Sillard, The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97), IERS Paris, Technical Note No.27, 1999.
- De Mets C.; R. Gordon, D.F. Argus, S. Stein, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophys. Res Lett. (21) 21 91-2194, 1994
- Gillone R. and C. Brunini, Setting boundaries, GPS World, Vol.10 Num.2, Advanstar Communications, 1999.
- IGM, Disposición Permanente N° 13/97, Instituto Geográfico Militar, Buenos Aires, 1997.



Moirano J., Materialización del Sistema de Referencia Terrestre mediante observaciones GPS.
Tesis doctoral. FCAG. UNLP. 2000.

Usandivaras, J.C., A. Mesa, Tópicos de Geociencias. Un volumen de estudios Sismológicos,
Geodésicos y Geológicos en homenaje al Ing. Fernando Séptimo Volponi. Vol 1, Ed.EFU
.ISBN N° 950-605-340-5. San Juan. 2004.

SIRGAS <http://dgfi.badw-muenchen.de>, 1995.