

NUUEVO MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO



RGNSIRGAS - CHILE

2008

Monolito IGM

Punto Geodésico que representa a la Red Geodésica Nacional SIRGAS-CHILE y que se encuentra a libre disposición de cualquier usuario.



Sistema de Referencia SIRGAS

<i>Latitud:</i>	<i>33° 27' 08, 003'' Sur</i>
<i>Longitud:</i>	<i>70° 39' 29, 073'' Oeste</i>
<i>Norte:</i>	<i>6.297.348, 374 m.</i>
<i>Este:</i>	<i>345.895, 944 m.</i>
<i>Altura N.M.M.:</i>	<i>540, 838 m.</i>
<i>Elipsoidal:</i>	<i>568, 041 m.</i>
<i>Gravedad:</i>	<i>979.413, 080 Mgl.</i>

Prólogo

EL IGM se complace en dar a conocer la nueva Red Geodésica Nacional basada en el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS).

En este texto se presentan los principales aspectos que caracterizan a esta red geodésica como también los elementos relevantes que han contribuido a su desarrollo, destacándose aquellos proyectos de cooperación internacional, tales como: Andes Centrales, Actividades Geodinámicas Sudamericanas, Observatorio Geodésico Transportable Integrado (TIGO), entre los más relevantes.

Asimismo, se señalan aquellas actividades de cooperación nacional como las campañas conjuntas y trabajos de monumentación, nivelación geométrica de alta precisión, gravimetría, posicionamiento satelital e instalación de estaciones activas fijas que ha realizado este Instituto.

Esta Red Geodésica Nacional queda a disposición de la comunidad para su pleno uso en los distintos campos de aplicación requeridos para el desarrollo del país.

La Dirección

1. Introducción

Chile, debido a su especial situación geográfica, producto de su posición y de su angosto y extenso territorio, ha debido adoptar a través del tiempo diversos sistemas de referencia geodésicos, los que en su conjunto han definido la Red Geodésica Nacional de Chile (RGN), sobre la que se sustenta la estructura cartográfica del país.

El Instituto Geográfico Militar, autoridad Oficial del Estado de Chile, tiene la misión de proporcionar un Marco de Referencia de acuerdo con las exigencias de los estándares internacionales actuales, en la producción de información georreferenciada. Debido a lo anterior, se hace necesario contar con un moderno y nuevo Sistema de Referencia del control horizontal, vertical y de gravedad de nuestra red, permitiéndonos generar y mantener actualizado un Marco de Referencia Homogéneo para todo el país.

La Red Geodésica Nacional es el Marco de Referencia de todas las actividades y representaciones geodésicas y cartográficas, y está compuesta por puntos geodésicos creados, calculados y materializados por este Instituto, los que poseen valores de coordenadas geográficas, planas, alturas y valores de gravedad.

La eficiente incorporación de sistemas satelitales en la implementación de extensas redes de control horizontal y la adopción del “Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas” (SIRGAS), establecen las bases para estructurar una moderna Red Geodésica para Chile, considerando los estándares de precisión geodésicos internacionales vigentes.

Este documento tiene como objetivo informar y difundir la situación actual de un nuevo Marco de Referencia Homogéneo adoptado para Chile, lo que repre-

senta la oportunidad de generar una referencia única para el país y el resto de las naciones participantes del proyecto.

2. Sistemas de Referencias en Chile.

La antigua Red Geodésica Nacional está compuesta por alrededor de 6.500 vértices trigonométricos de primer a tercer orden geodésico, estos puntos poseen coordenadas y alturas, materializadas a lo largo y ancho del país, los que han dado el soporte adecuado a nuestra cartografía y al sistema de referencia geodésico nacional. Esta red está vinculada en aproximadamente un 80% a pilares de nivelación y que están referidos al Nivel Medio del Mar (N.M.M.).

Esta red convencional, establecida durante las últimas cinco décadas por sistemas geodésicos clásicos, ha obligado a adoptar simultáneamente diferentes elipsoides de referencia, tales como: los elipsoides Internacional de 1924 y Sudamericano de 1969, para la confección cartográfica del país (Tabla 1). En la cartografía regular a escala 1:50.000 se han utilizado los Datum PSAD-56 entre los 17° 30' a los 43° 30' de latitud sur, y el Datum SAD-69 ha sido empleado desde los 43° 30' a los 56° de latitud sur, correspondientes a la zona sur austral del país.

Elipsoide	Internacional 1924	Sudamericano 1969
a	6378388	6378160
f	1 : 297	1 : 298.25
b	6356911.94612795	6356774.71919531
e ²	0.00672267002233332	0.00669454185458764

Tabla 1. Parámetros Elipsoides.

Debido al gran avance tecnológico, como es la integración de GPS, se ha conformado un moderno sistema global de posicionamiento, el que está re-

ferenciado al Sistema Geodésico Mundial del año 1984, nos permite estructurar y homogeneizar todos los valores de la red con una alta precisión geodésica, sustituyendo a los antiguos sistemas de referencia. En Chile se decide emplear esta nueva tecnología la que conforma un marco de referencia integrado, moderno y versátil, que sirve de base para los diferentes proyectos y necesidades técnicas y científicas, proporcionando la unificación de la georreferenciación.

El Instituto, consciente de las ventajas de este nuevo sistema de referencia geodésico, accede a adoptarlo en su georreferenciación, tanto es así, que en colaboración con entidades científicas internacionales, logra materializar una nueva Red Geodésica Nacional, logrando su vinculación a sistemas de orden geodésico superior, a nivel continental y mundial.

Se adopta como referencia nacional, el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), proyecto geodésico del continente, con el fin de eliminar la heterogeneidad de sistemas de referencias utilizados hasta ahora, para minimizar problemas que provienen de la diversidad de sistemas geodésicos locales, utilizados entre países limítrofes de la región.

SIRGAS cuenta con una precisión compatible con las técnicas actuales de posicionamiento, asociados a los Sistemas Globales de Navegación. Por otro lado, la adopción del ITRS (International Terrestrial Reference System) además de garantizar la homogeneidad de los resultados internos de América, también permite una integración consistente con redes de otros continentes, contribuyendo cada vez más al desarrollo de una geodesia global.

Para actualizar nuestra red e integrarla al SIRGAS, se cumple la etapa básica y elemental de densificar, recuperar, remedir y actualizar la antigua Red Geodésica Nacional.

Las mediciones geodésicas GPS para esta nueva red nacional se realizan desde el año 1992, contando con un total de 500 vértices GPS localizados en diferentes lugares geográficos a lo largo y ancho del país, desde la XV Región al Territorio Chileno Antártico e islas oceánicas.

2.1 SIRGAS

Los directores de los Institutos Geográficos de Sudamérica, España y Portugal (DIGSA), conscientes de la necesidad de hacer compatibles los Sistemas Geodésicos Locales de Referencia utilizados por los diferentes países de América del Sur, acordaron promocionar la definición y establecimiento de un Datum único: SIRGAS.

El proyecto SIRGAS fue creado durante la Conferencia Internacional para la Definición de un Referencial Geocéntrico para América del Sur, realizada en octubre de 1993, en Asunción, Paraguay, apoyada por el ex NIMA (National Imagery Mapping Agency) hoy NGA (National Geospatial – Intelligence Agency), IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia), IAG (International Association of Geodesy), y cada uno de los institutos de los países comprometidos. Esta conferencia contó con una numerosa participación de representantes de los países de América del Sur, colaborando de esta manera a su éxito.

2.2 Objetivos

En la reunión mencionada anteriormente se definieron los siguientes objetivos del proyecto:

- (a) Definición de un Sistema Geocéntrico de Referencia para América del Sur, adoptando inicialmente el ITRS (International Terrestrial Reference

System), realizado en la ocasión por el ITRF (International Terrestrial Reference Frame) de 1993, y el elipsoide GRS-80 (Geodetic Reference System 1980).

- (b) Establecimiento y mantenimiento de un Datum geocéntrico.
- (c) Establecimiento y mantenimiento de un Datum vertical unificado.

El proyecto se conformó por un comité ejecutivo del que dependen tres grupos de trabajo con objetivos complementarios:

Grupo I.- Definir el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas y materializarlo mediante una red de estaciones distribuidas en todos los países integrantes. (Realizado)

Grupo II.- Densificar la red SIRGAS en cada uno de los países con un criterio unificado y consensuado. (Realizado)

Grupo III.- Definir un Datum Vertical para las Américas y materializarlo en cada país sobre el modelamiento geoidal determinado por el Grupo de Trabajo II, efectuando mediciones geodésicas, gravimétricas y satelitales. (En desarrollo)

2.3 Marco de Referencia SIRGAS 1995

Para la realización de este Marco de Referencia se llevó a cabo una campaña en la que se realizaron mediciones en 58 estaciones distribuidas en Sudamérica y observadas con GPS, en el período comprendido entre el 26 de mayo y el 4 de junio de 1995 (Figura 1). Los resultados de esta campaña fueron difundidos en la asamblea de la Asociación Internacional

de Geodesia (IAG), realizada en Río de Janeiro en septiembre de 1997, dichos resultados se traducen en el Marco de Referencia Continental de mayor precisión de América del Sur. Las coordenadas finales del Marco de Referencia SIRGAS 1995 están referidos al ITRF94, época 1995.4.



Figura 1. SIRGAS 1995.

2.4 Marco de Referencia SIRGAS 2000

En ocasión de la primera reunión del proyecto en octubre de 1993, en Asunción, Paraguay, se recomendó la reobservación de la red de referencia al quinto año, con el objetivo de mantener actualizado este Marco de Referencia, y que tiene el propósito de atender los estándares actuales de precisión en posicionamiento horizontal (cálculo de velocidades de las estaciones).

Dado que uno de los objetivos finales de este proyecto es la definición y realización de un sistema vertical de referencia unificado para todos los

países de la región, que sea a su vez compatible con las nuevas técnicas de posicionamiento satelital (en combinación con modelos geoidales de alta resolución), se acordó la vinculación de los sistemas de alturas clásicos (definidos a partir del nivel medio del mar registrado individualmente en mareógrafos aislados) al sistema de referencia SIRGAS, así como la conexión internacional de las redes de nivelación de cada país participante. Con este propósito, la segunda campaña SIRGAS incluyó las estaciones mareográficas que definen el referencial altimétrico y las estaciones ocupadas en la campaña del año 1995, satisfaciendo así el objetivo del proyecto SIRGAS respecto a definir el datum vertical.

Cabe destacar que en la campaña del año 2000, se incorporaron países de Centro y Norteamérica, incrementando a 184 el número de estaciones que conforman el proyecto. El período de observación fue del 10 al 19 de mayo del 2000. (Figura 2). Y los resultados finales fueron presentados en febrero de 2003, los que están referidos al ITRF 2000, época 2000.4.



Figura 2. SIRGAS 2000.

3. Situación Chilena

El Instituto Geográfico Militar (IGM), permanentemente durante su historia Ha estado actualizando la RGN, lo que ha permitido implementar, en el año 2001, el Proyecto de Modernización y Homogeneización de la Red Geodésica Nacional utilizando el marco de referencia creado para la definición de SIRGAS-2000, y conforme al compromiso adquirido por cada país de densificar sus redes internas.

Este nuevo Marco de Referencia Geocéntrico para Chile, que preliminarmente se estructuró con 269 vértices geodésicos de alta precisión incluyendo 141 vértices de la antigua red geodésica nacional y que al día de hoy cuenta con más de 500 puntos debidamente monumentados en terreno, conforman una de las redes más densificadas del continente. (Figura 3).



Figura 3. Red Geodésica Nacional SIRGAS - Chile.

Los vértices que conforman el nuevo marco de referencia fueron medidos durante 4 campañas de terreno realizadas entre mayo de 2001 y agosto de 2002. La etapa de procesamiento y ajuste fue realizada por la Sección Cálculos del Departamento Geodésico del Instituto Geográfico Militar, utilizando el software Bernese V-4.5. Para mayor información del software mencionado, ingresar a la página web www.bernese.unibe.ch.

Finalmente, los resultados obtenidos se traducen en coordenadas referidas al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) definido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) para el año 2000, con época de ajuste 2002.0 y parámetros del elipsoide GRS-80 (Geodetic Reference System). (Tabla 2).

RED GEODÉSICA NACIONAL SIRGAS CHILE	
Control Horizontal	
Sistema de Referencia	SIRGAS
Marco de Referencia	ITRF 2000
Datum	Geocéntrico
Elipsoide	GRS - 80
Total de Puntos	500
Época de Ajuste	2002.0

Tabla 2. Parámetros RGN SIRGAS Chile.

El elipsoide calculado y el más utilizado a nivel mundial en la definición de plataformas de referencia es el GRS-80 (Geodetic Reference System, 1980), el que en sentido práctico posee los mismos valores en sus elementos geométricos comparado con el elipsoide WGS-84 (Tabla 3). Éste fue determinado a partir del cálculo de las órbitas satelitales del sistema TRANSIT y de la constelación NAVSTAR (Navigation System with Time and Ranging). Las constantes de estos dos elipsoides son idénticas, con excepción de una pequeña variación en el factor

dinámico de la deformación. Sin embargo, las longitudes geodésicas calculadas sobre ellos son iguales, y las diferencias máximas que se presentan entre las latitudes correspondientes alcanzan los 0.00003 segundos de arco (0.1 mm).

Elipsoide	GRS80	WGS84
a	6378137	6378137
f	1:298.257222101	1:298.257223563
b	6356752.3141	6356752.3142
w	$7292115 \cdot 10^{-11}$ rad s ⁻¹	$7292115 \cdot 10^{-11}$ rad s ⁻¹
GM	$3986005 \cdot 10^8$ m ³ s ⁻²	$3986005 \cdot 10^8$ m ³ s ⁻²
e ²	0.00669438002290	0.00669437999014

Tabla 3. Parámetros Elipsoides.

3.1 Red Geodésica Nacional SIRGAS-CHILE

Este nuevo marco de referencia constituye la base para la utilización de la tecnología GPS en Chile. No obstante, especialmente por la dinámica que presenta nuestro país, debe ser actualizada, perfeccionada y controlada permanentemente, de manera que se puedan cuantificar los cambios generados por la dinámica de placas que afecta periódicamente al país, sin provocar problemas en su aplicación. Importante es destacar que Chile tiene una velocidad media de desplazamiento de 2 cm al año en dirección noreste. Debemos tener presente que Chile es un país sísmico por excelencia, lo que incide en tener que remedir un nuevo marco de referencia en las zonas afectadas, cada vez que ocurra un acontecimiento de estas características.

La Red Geodésica Nacional SIRGAS-CHILE está conformada por 3 redes fundamentales:

- Red de Estaciones Activas Fijas.
- Red Básica.
- Red de Densificación.

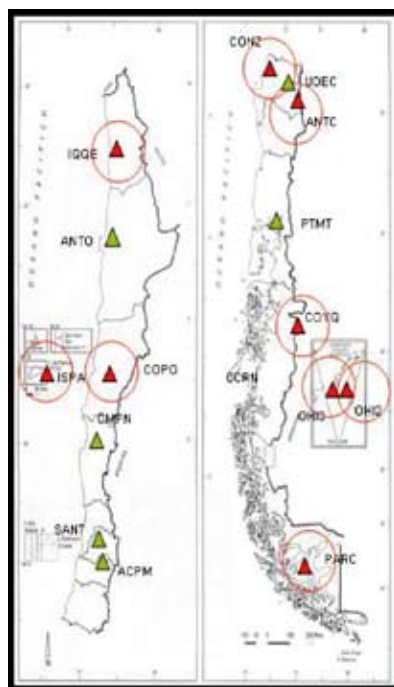
3.1.1 Red de Estaciones Activas Fijas (EAF)

Red de Estaciones Activas Fijas, es la que permite calcular continuamente coordenadas para apoyar cualquier medición diferencial GPS y además monitorear el desplazamiento de las placas tectónicas determinando velocidades y desplazamientos.

El conjunto de EAF, es la base de un marco de referencia regional, el que funciona durante todo el año asegurando un máximo de flexibilidad en la planificación de proyectos geodésicos, permitiendo que actividades científicas, gubernamentales, comerciales y privadas asociadas con la geodesia se integren a un marco de referencia nacional, de acuerdo con sus respectivos intereses. El Instituto en conjunto con el Departamento de Geomensura de la Universidad de Concepción, sede Los Ángeles, está efectuando el mantenimiento, bajada de datos, procesos y subida de la información a la página web de todas las estaciones fijas que están en funcionamiento en nuestro país.

Esta red actualmente está conformada por 15 estaciones GPS de monitoreo continuo, con la utilización de equipos geodésicos doble frecuencia, adecuados para la recolección de datos en forma permanente, durante todos los días del año, las 24 horas (Figura 4). Estas estaciones además de cumplir su función principal de ser el marco de referencia y proporcionar coordenadas, permiten utilizar esta información en otras aplicaciones como: cálculo de velocidades, estudio de deformaciones de la superficie terrestre y aportar a los usuarios la data de ellas. Estas

estaciones han sido instaladas en lugares con adecuada protección y seguridad, como universidades y unidades de las Fuerzas Armadas y Carabineros de Chile.



Red de Estaciones Activas Fijas	
IQQE (IGS)	Iquique
ANTO	Antofagasta
ISPA (IGS)	Isla de Pascua
COPO (IGS)	Copiapó
CMPN	La Campana
SANT	Santiago
ACPM	Academia Politécnica
CONZ (IGS)	Concepción
UDEC	Universidad de Concepción
ANTC (IGS)	Antuco
PTMT	Puerto Montt
COYQ (IGS)	Coihaique
OHI2 (IGS)	O'Higgins 2
OHI3 (IGS)	O'Higgins 3
PARC	Punta Arenas

Figura 4. Red de Estaciones Activas Fijas.

La Red de Estaciones Activas Fijas originó el desarrollo técnico de dos partes fundamentales:

- 1) Marco de Referencia Activo, que corresponde directamente a las estaciones de monitoreo continuo establecidas y proyectadas en todo el país, utilizando como criterio para su instalación, el que su estructura abarque la cobertura nacional, considerando un radio promedio de 100 kilómetros, con el fin de dar respuesta a la demanda para otras disciplinas (Foto 1). En un futuro próximo se integrarán a esta red las estaciones que conformarán la Red Sismológica de Chile, proyecto que pertenece al Departamento de

Geofísica de la Universidad de Chile y que estará en funcionamiento a fines del año 2008.



Foto 1. Estación Activa Fija Iquique.

- 2) Centro de Recepción, Control y Procesamiento de Datos (CRCP) es el encargado de recibir, controlar, automatizar y procesar los archivos de datos generados diariamente por cada una de las estaciones, teniendo un control efectivo del funcionamiento de ellas, a fin de mantener un sistema de referencia continuo y poner a disposición de los usuarios en el menor tiempo posible esta información. Este servicio estará disponible en el primer semestre del año 2008 en un link de la página web del Instituto Geográfico Militar.

El procesamiento de los datos se realiza en forma automatizada con el software Bernese 5.0, asegurando una rápida respuesta a los requerimientos de valores de coordenadas, cálculo de velocidades y deformación de las placas tectónicas a lo largo del país, como también poder determinar en un muy corto plazo la deformación producida por algún sismo de mayor intensidad.

3.1.2 Red Básica

La Red Básica (Figura 5) está compuesta por puntos que se utilizan para el cálculo de variaciones periódicas de sus coordenadas a través de la remediación cada 4 años, permitiendo determinar desplazamientos y velocidades.

La Red Básica está conformada por 50 vértices que están distribuidos uniformemente a lo largo del país, en los sectores donde no se cuenta con Estaciones Activas Fijas, con el objetivo de determinar la variación de las coordenadas y así obtener intervalos de cambio de velocidades y desplazamientos.

Esta red es determinada con una precisión horizontal de orden geodésico GPS. Esta precisión se logra bajo un criterio de ajuste, realizando 48 horas de medición continuas, empleando efemérides satelitales precisas.

En la conformación y medición periódica de esta red, el Instituto Geográfico Militar ha trabajado en conjunto con organismos científicos internacionales desde 1993, desarrollando proyectos de geodinámica de placas, aprovechando la información obtenida ya sea para fines tectónicos y/o como puntos de control terrestre para los levantamientos aerofotogramétricos.

3.1.2.1 Proyectos con organismos internacionales (CAP y SAGA)

Los proyectos Central Andes Project (CAP) y South American Geodynamic Activities (SAGA), en convenio con el Instituto Geográfico Militar, proponen observar deformaciones de uno de los generadores más proliferos de movimientos sísmicos de gran magnitud y duración en el mundo.



Figura 5. Red Básica.

La distribución propuesta de estaciones regionales GPS a lo largo del país está enfocada hacia las mediciones de deformaciones en la región colindante con la zona sísmica interplacas, pero incluye tres estaciones en la Placa de Nazca y 297 estaciones a lo largo de los Andes, para establecer el desplazamiento total de las placas y las deformaciones en el Orogénico Andino.

La Red GPS será observada periódicamente cada dos años durante campañas con un funcionamiento de al menos veinte receptores en un patrón de despliegues móviles y fijos en forma transitoria. Durante años alternados se lleva a cabo un programa de densifica-

ción especial de la Red Regional de Trabajo, la que está dirigida a sectores especialmente seleccionados.

3.1.2.1.1 Objetivos del Proyecto CAP

Desarrollar y mantener una Red Regional de Trabajo en Chile, Argentina y Bolivia, con el fin de monitorear los desplazamientos de la corteza por sobre la cual se encuentra, probablemente, el límite más activo de las placas terrestres y a lo largo de una extensa zona de deformación de la corteza, asociada a la subducción de la Placa de Nazca existente bajo la cordillera de los Andes.

En primer lugar, los objetivos científicos a corto plazo son mediciones de deformaciones sísmicas y asísmicas en el ciclo de mayor ocurrencia de movimientos sísmicos con relación a la convergencia de placas y de tectónicas de las zonas de subducción.

En segundo lugar, los objetivos a largo plazo, son el establecimiento de una línea de referencia medida para la determinación de deformaciones horizontales y verticales en el arco anterior y a través de la cordillera de los Andes.

3.1.2.1.2 Estrategia de Observación del Proyecto CAP y Geometría de la Red de Trabajos GPS

La estrategia de medición fue construir una Red-GPS nacional, la cual sería ocupada con un intervalo de dos años con un requerimiento de alrededor de veinte georreceptores GPS,

después de una primera gran campaña de medición regional andina.

Se reocuparán las redes locales sólo como respuesta ante un evento externo como sería un gran terremoto, o debido a que la deformación observada de la Red-GPS nacional indique un desarrollo de señales en el área donde la cobertura existente es muy densa.

La red regional andina, como se visualiza actualmente, consistió en instalar tres estaciones en las islas ubicadas en la Placa de Nazca, ciento cuarenta y nueve estaciones en Chile Continental, veinte en Argentina, cuatro en Bolivia y una en Perú.

Se ocuparon los puntos VLBI en La Silla (Chile), y los puntos SLR en el Cerro Tololo (Chile) y en Arequipa (Perú). La Red Regional GPS incluye además el punto CIGNET en Santiago (Chile).

La geometría de la Red-GPS nacional refleja una gran cantidad de ventajas, siendo las más importantes su cobertura, densidad y número de estaciones. Cubre cerca de 38° de latitud, entre Arica y el Cabo de Hornos.

Luego se densificará esta área a través de campañas subsidiarias, si así se estimare. Las redes se reducen en dirección al sur, al igual que el cinturón orogénico y la zona de terremotos de interplacas superficiales. La red que se extiende al sur de los $43^\circ 30'$ de latitud, se pretende reocupar una vez cada seis años.

3.1.2.1.3 Proyecto Actividades Geodinámicas Sudamericana (SAGA)

Dado el interés científico que presenta el estudio tectónico de la región de los Andes, el gobierno alemán, a través del Geo-Forschungs Zentrum Potsdam (GFZ), en convenio con el Instituto Geográfico Militar, se encuentran desarrollando un proyecto de similares características que el enunciado anteriormente.

3.1.2.1.4 Objetivos del Proyecto SAGA

El Proyecto SAGA (South American Geodynamic Activities), contempla efectuar mediciones geodésicas en la Red SAGA, en el territorio de Chile, aplicando el Sistema Global de Posicionamiento (GPS).

El objetivo de este proyecto es la determinación del movimiento en el área de subducción de las capas de Nazca y Sudamericana, y a lo largo de zonas disturbadas, sísmicamente activas. De ahí que sea preciso medir las redes nacionales cada dos años.

El interés del Instituto Geográfico Militar en participar en el Proyecto SAGA no tiene otro objetivo que la de obtener una Red Geodésica homogénea en todo el territorio nacional, aplicando la tecnología del sistema GPS.

En el convenio establecido entre el IGM y el GFZ está previsto conectar la red SAGA mediante estaciones fijas, que están integradas en la Red Global del "Internacional GPS Geodynamic

Service”, al Sistema Global de Referencia. Para este fin, dos receptores GPS con acceso a los códigos P e Y están establecidos permanentemente como estaciones activas fijas en las ciudades de Antofagasta y Puerto Montt, integrándolas como estaciones fiduciales en la Red IGS.

A su vez, la Red SAGA ha sido reobservada como mínimo cada dos años. El programa especial de trabajo para los diferentes ciclos de medición a través de GPS, son elaborados en conjunto, entre el IGM y el GFZ, antes de cada ciclo de medición.

El equipamiento utilizado es proporcionado por el grupo alemán, correspondiendo éste a georreceptores con código P e Y.

La duración de los proyectos de medición SAGA 1993 al 2003, es de 45 días en donde se mide un promedio de 80 estaciones, de las cuales cuatro corresponden a estaciones Máster, como es el caso de Puerto Montt, Isla San Félix, Antofagasta y Socompa, las restantes estaciones son móviles.

Cada sesión de medición se realiza durante tres días continuados en las estaciones temporales. Las estaciones Máster miden en forma correlativa, efectuando el vaciado de la información cada tres días de medición.

3.1.2.2 Modelo de Velocidades para Sudamérica

“Las observaciones geodésicas espaciales proporcionan el movimiento de un punto en tres dimensiones en América del Sur”; es

la expresión que utilizan O. Heidbach y H. Drewes para comenzar un documento sobre el tema. La aseveración es el resultado de las campañas SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) después de las campañas de 1995 y 2000.

Las diferencias de los desplazamientos producidos en un tiempo determinado y medidos por las velocidades de las estaciones, calculadas en los Andes centrales, han entregado valores en promedio de 2 cm/año. Por lo tanto, es altamente recomendable determinar las velocidades verdaderas de las estaciones en el área mediante la determinación de coordenadas por mediciones repetidas.

Aparte de las deformaciones continuas tenemos también que considerar movimientos no uniformes del terreno, como por ejemplo los producidos por terremotos, que muchas veces obliga a generar un nuevo marco de referencia en la zona afectada.

Todo lo anterior fue considerado por el Proyecto SIRGAS y por cada país participante, con el fin de aplicar este factor principalmente en el control y corrección de las coordenadas SIRGAS, ya que éstas representan el Marco de Referencia de cada país. Además, existe una gran variedad de trabajos específicos donde es necesario considerar las velocidades asociadas a las coordenadas, como por ejemplo, grandes obras de ingeniería, minería, monitoreo de deformación, entre otras.

Es así como en el año 2003, el proyecto SIRGAS puso a disposición de los usuarios un modelo denominado Velinter, el que permite interpolar las componentes horizontales de las velocidades tectónicas en cualquier ubicación dentro del continente sudamericano,

al norte de la latitud aproximada de 45° . El algoritmo utilizado se basa en un campo continuo de velocidades calculado a partir de las velocidades geodésicas determinadas luego de las campañas de terreno de los años 1995 y 2000, las calculadas por el Centro de Procesamiento de Datos SIRGAS y por otros proyectos de investigación desarrollados en América del Sur. Para establecer dicho campo se utilizaron los métodos de elementos finitos y de colocación por mínimos cuadrados.

En el año 2008 el IGM tiene considerado la obtención de un nuevo modelo de velocidades para el país, para lo que se están procesando actualmente datos históricos desde el año 1993 a la fecha, con el objetivo de determinar un modelo de velocidades reales para nuestro territorio, y así establecer una serie de estaciones a lo largo del país, para controlar el modelo de velocidades en el tiempo.

El modelo y programa Velinter que calcula las velocidades de cada punto, están disponibles en la página web del Proyecto SIRGAS. (www.sirgas.org)

3.1.3 Red de Densificación

Red de Densificación está conformada por una cantidad de puntos distribuidos homogéneamente a lo largo y ancho del país, de manera que los usuarios tengan acceso directo a ellos. Esta red tiene por objetivo llegar a tener un marco de referencia distribuido homogénea y estratégicamente en el territorio nacional, estableciendo idealmente llegar a tener estaciones cada 50 kilómetros, permitiendo con esto que cualquier usuario tenga a su disposición algún vértice para referenciar su proyecto (Figura 6).



Figura 6. Red de Densificación.

La red de densificación, además, concentra las dos redes mencionadas anteriormente, específicamente la red de estaciones permanentes y la red básica, más las estaciones de los proyectos científicos CAP y SAGA, en los cuales el Instituto participa activamente en la realización de campañas de medición, cuyo objetivo es controlar la dinámica de placas en el continente.

Estos puntos están debidamente monumentados mediante una placa de bronce, en el caso de los pilares trigonométricos pertenecientes a la antigua red geodésica nacional, o a un pin (cilindro) de acero que indica que el punto ha sido creado para la densificación de la nueva Red Geodésica (Figura 7).

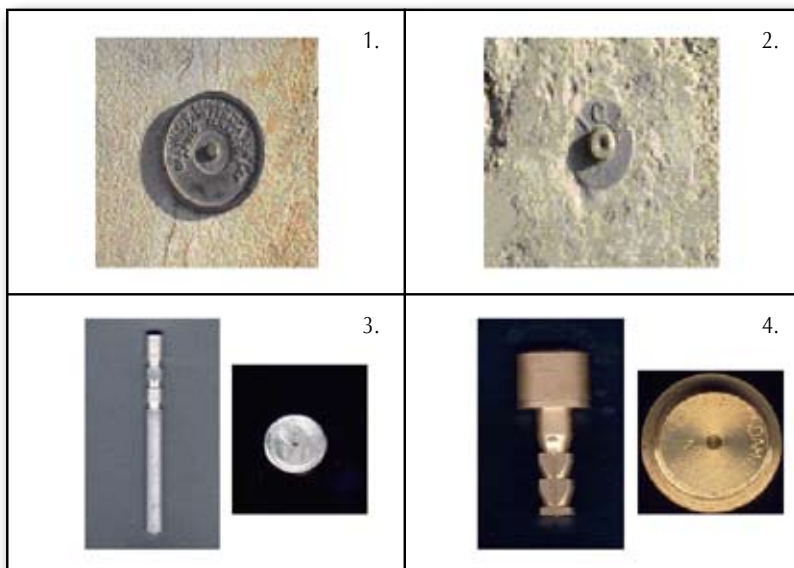


Figura 7. Tipos de monumentos utilizados por el IGM.

1. Antigua Red de Trigonómicos.
2. Nueva Red.
3. Proyecto CAP.
4. Proyecto SAGA.

El IGM dentro de sus objetivos anuales considera la ejecución de campañas de densificación, con la finalidad de establecer nuevos vértices. Adicional a lo anterior, cada cierto período se invita a diferentes instituciones y usuarios en general a participar en campañas de densificación, donde cada uno de los usuarios crea sus vértices y realiza las mediciones bajo las normas que entrega este Instituto, para finalmente procesar la información. (www.igm.cl)

4. Período de Transición

Con la adopción de este nuevo Sistema de Referencia Geocéntrico en el año 2002, se inicia un período de transición en el cual se reemplazaron los Sistemas de Referencia Geodésicos vigentes a esa fecha en la cartografía nacional, donde

el Datum PSAD-56 era utilizado para la cartografía regular a escalas 1:50.000 de los 17° 30' a los 43° 30' de latitud sur del país, y el Datum SAD-69 empleado desde los 43° 30' a los 56° de latitud sur correspondiente a la zona sur austral.

Durante el período de transición el IGM se compromete a mantener vigente la información de los sistemas de referencia utilizados, tanto el actual como el antiguo, proporcionando así la cartografía reeditada a la fecha con el nuevo sistema de referencia SIRGAS, apareciendo enunciada en los bordes de las cuadrículas, los valores de la grilla en PSAD-56 o SAD-69, según corresponda, mostrando estos valores en color azul (Figura 8).

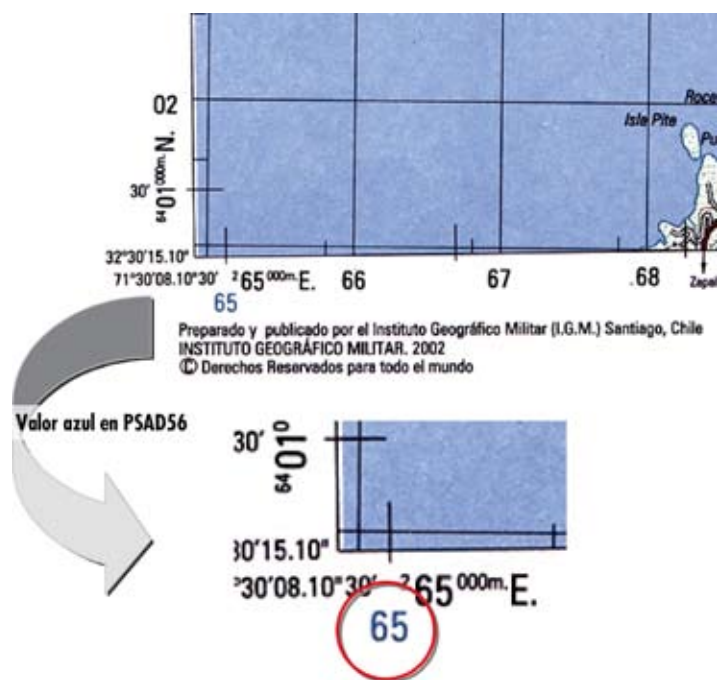


Figura 8. Cartografía en período de transición (ambos sistemas).

De igual forma, en lo que respecta a la georreferenciación, se están utilizando parámetros de transformación entre los sistemas antiguos tradicionales y el nuevo sistema de referencia, utilizando tres juegos de parámetros para PSAD-56 y cuatro en SAD-69 (Tablas 4 y 5), los que fueron obtenidos a través de la

remediación de vértices geodésicos seleccionados de la antigua Red Geodésica Nacional.

Transformación de SIRGAS a PSAD-56		
Lat. inicial 17° 30'	Lat. inicial 26° 00'	Lat. inicial 36° 00'
Lat. final 26° 00'	Lat. final 36° 00'	Lat. final 44° 00'
$\Delta X = 302$ m	$\Delta X = 328$ m	$\Delta X = 352$ m
$\Delta Y = -272$ m	$\Delta Y = -340$ m	$\Delta Y = -403$ m
$\Delta Z = 360$ m	$\Delta Z = 329$ m	$\Delta Z = 287$ m

Transformación de PSAD-56 a SIRGAS		
Lat. inicial 17° 30'	Lat. inicial 26° 00'	Lat. inicial 36° 00'
Lat. final 26° 00'	Lat. final 36° 00'	Lat. final 44° 00'
$\Delta X = -302$ m	$\Delta X = -328$ m	$\Delta X = -352$ m
$\Delta Y = 272$ m	$\Delta Y = 340$ m	$\Delta Y = 403$ m
$\Delta Z = -360$ m	$\Delta Z = -329$ m	$\Delta Z = -287$ m

Tabla 4. Parámetros de Transformación SIRGAS – PSAD56.

Transformación de SIRGAS a SAD-69			
Lat. inicial 17° 30'	Lat. inicial 32° 00'	Lat. inicial 36° 00'	Lat. inicial 44° 00'
Lat. final 32° 00'	Lat. final 36° 00'	Lat. final 44° 00'	Lat. final 56° 00'
$\Delta X = 59$ m	$\Delta X = 64$ m	$\Delta X = 72$ m	$\Delta X = 79$ m
$\Delta Y = 11$ m	$\Delta Y = 0$ m	$\Delta Y = -10$ m	$\Delta Y = -13$ m
$\Delta Z = 52$ m	$\Delta Z = 32$ m	$\Delta Z = 32$ m	$\Delta Z = 14$ m

Transformación de SAD-69 a SIRGAS			
Lat. inicial 17° 30'	Lat. inicial 32° 00'	Lat. inicial 36° 00'	Lat. inicial 44° 00'
Lat. final 32° 00'	Lat. final 36° 00'	Lat. final 44° 00'	Lat. final 56° 00'
$\Delta X = -59$ m	$\Delta X = -64$ m	$\Delta X = -72$ m	$\Delta X = -79$ m
$\Delta Y = -11$ m	$\Delta Y = 0$ m	$\Delta Y = 10$ m	$\Delta Y = 13$ m
$\Delta Z = -52$ m	$\Delta Z = -32$ m	$\Delta Z = -32$ m	$\Delta Z = -14$ m

Tabla 5. Parámetros de Transformación SIRGAS – SAD69.

Algunos antecedentes de importancia a tener en cuenta son:

- En la determinación de los parámetros de transformación se utiliza el modelo de Molodensky.

- La precisión de transformación de Datum es de ± 5 metros.
- El IGM pone a disposición de los usuarios un software de transformación de libre disposición, el que se encuentra en el CD "Red Geodésica Nacional SIRGAS – Chile".

5. Control Vertical

Los levantamientos verticales comprenden todas aquellas operaciones de terreno dirigidas a determinar la distancia vertical que existe entre puntos situados sobre o cerca de la superficie terrestre y el nivel de referencia definido por el geoide. En lo que respecta a las alturas, todo punto perteneciente a un levantamiento vertical deberá estar referido al nivel medio del mar (sistema vigente en Chile), encontrándose ubicadas las líneas de nivelación a lo largo del país, principalmente al borde de las carreteras. (Figura 9)

La adopción del Sistema de Referencia SIRGAS garantiza la solución de las discrepancias existentes entre los diferentes marcos de referencias nacionales. Su principal ventaja radica en que se constituye en una plataforma común de referencia horizontal. Sin embargo, la disparidad persiste al comparar la posición vertical entre países vecinos. Esta circunstancia busca la definición de un sistema vertical que satisfaga no sólo las demandas de la representación cartográfica, sino también las exigencias de control geodésico actual y la homogeneización de este tipo de información a nivel internacional.

Este nuevo sistema obedece a una combinación de las alturas niveladas geométricamente, con los datos de gravedad registrados y las alturas elipsoidales obtenidas mediante los levantamientos GPS. En el caso de que se cuente con altura elipsoidal, ésta se deberá transformar a altura ortométrica a través de un modelo geoidal.

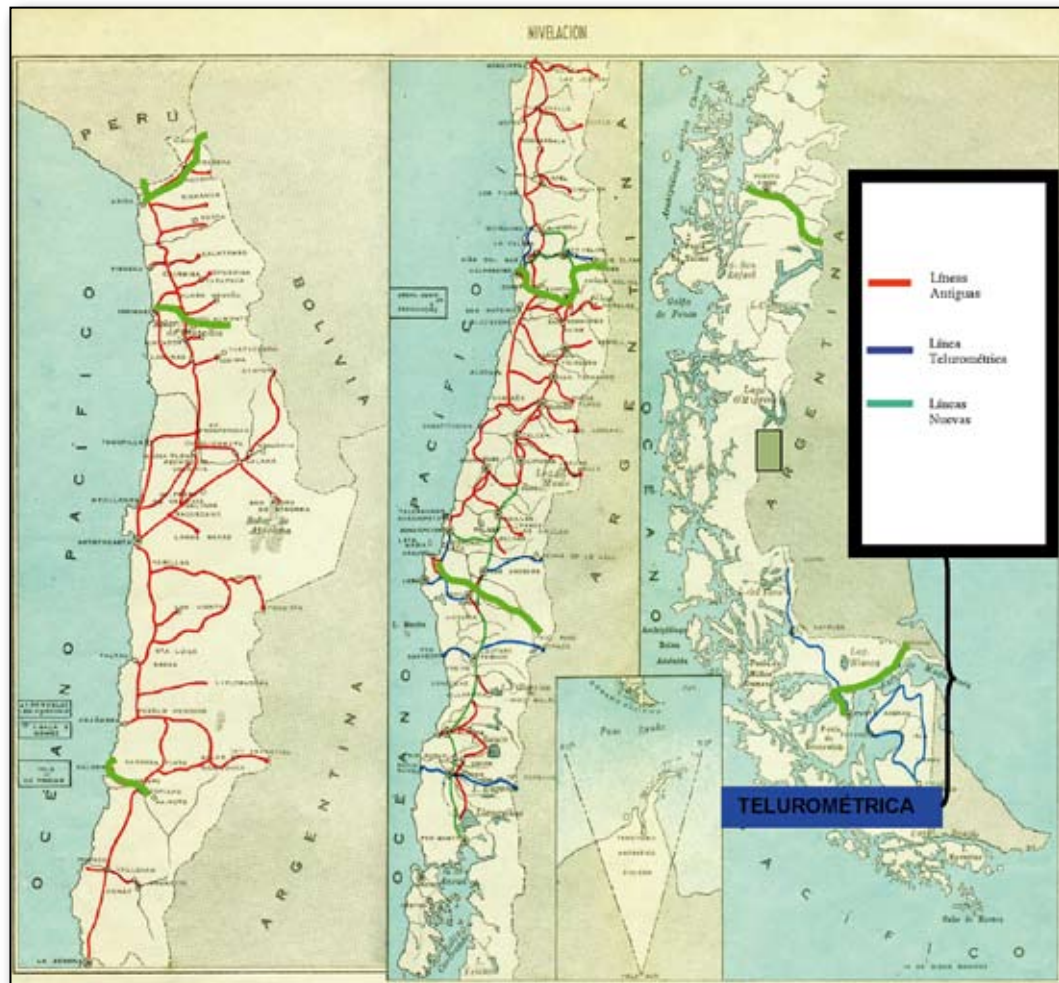


Figura 9. Red de Nivelación.

Lo anterior se enmarca dentro de las tareas dispuestas por el Grupo de Trabajo III - Sistema Vertical - SIRGAS, el que propone definir un único Datum Vertical para este nuevo sistema de referencia, el que se basa en la determinación de alturas normales, las que poseen como superficie de referencia una figura llamada "Cuasi-Geoide". Esta superficie se determina con métodos gravimétricos, según esto, las alturas normales se pueden obtener a partir de las alturas elipsoidales (entregadas por GPS), alturas geoidales \approx Nivel Medio del Mar (N.M.M.), y las anomalías de altura u ondulaciones cuasigeoidales determinadas por gravedad.

Las ventajas que poseen las alturas elipsoidales por sobre las alturas ortométricas, es que la determinación del cuasigeoide permite establecer una superficie de referencia que es estable en el tiempo, ya que las alturas elipsoidales provienen de un modelo matemático. No así el geoides que varía cada vez que se realizan nuevas mediciones.

La particular situación de Chile permite replantear y estudiar periódicamente el geoides más detalladamente en el sector andino. Los requerimientos de precisión exigen el conocimiento de información más precisa del geoides. En este sentido el Instituto ha estructurado las mediciones en forma periódica, con la finalidad de realizar mediciones gravimétricas y satelitales a los pilares de nivelación.

Para dar satisfacción a los requerimientos del Sistema de Referencia SIRGAS, a partir del año 2000 se han realizado las mediciones de 8 líneas de nivelación, sumando aproximadamente 700 kilómetros (Tabla 6), efectuando el desarrollo de dos tareas importantes, que son:

- a) Nivelación de las estaciones SIRGAS, determinando las alturas referidas al nivel medio del mar, a través de la medición de las líneas de nivelación cercanas a éstas, efectuando en conjunto mediciones gravimétricas y satelitales.
- b) Conexiones internacionales a través de las mediciones de líneas de nivelación con países limítrofes.

Nivelación	Antigua	Nueva
Precisión	Primer orden 4 mm \sqrt{K} Segundo orden 8 mm \sqrt{K} Tercer orden 12 mm \sqrt{K}	4 mm \sqrt{K}
Kilómetros	20000	700

Tabla 6. Características de la nivelación.

6. Sistema Gravimétrico

Los levantamientos gravimétricos son aquellos que comprenden la medida de valores absolutos o relativos del valor de la gravedad sobre puntos situados en o cerca de la superficie terrestre, cuyo propósito consiste fundamentalmente en determinar el valor de la aceleración de gravedad existente y su relación e influencia con los valores geodésicos horizontales y verticales.

El Instituto Geográfico Militar desarrolló el Proyecto de Recuperación de la Red Gravimétrica de Chile a fines de 1998, cuando se tomó contacto con el NGA de los Estados Unidos. Es así como en el transcurso del año 1999, el NIMA en conjunto con el IGM, participaron de una campaña de terreno para la determinación de las primeras estaciones de gravedad absoluta. Estas estaciones absolutas están referidas a IGSN71 (International Gravity Standardization Net de 1971) y el instrumental utilizado en su determinación corresponde a un gravímetro absoluto Micro-G Solutions, Inc. FG5, con una precisión de 0.025 mgal. (Tabla 7).

Estación	Antiguo	Nueva	Precisiones
Estaciones Absolutas	Ninguna	13	0.025 mgal
Estaciones Relativas	23	70	0.05 mgal
Cantidad Densificación	20000	1517	0.05 mgal

Tabla 7. Estaciones de gravedad en Chile.

Durante los años 2001-2006, las estaciones de gravedad absoluta han sido la base para la determinación de la Red de Estaciones Básicas de Gravedad (Figura 10) esta densificación se realiza con el apoyo de científicos pertenecientes al Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE), bajo la supervisión de la Universidad de Sao Paulo de Brasil, logrando establecer un total de 70 Estaciones Relativas, las que se encuentran ubicadas entre la XV Región (Visviri) y la

XII Región (Isla Grande de Tierra del Fuego). En estas mediciones se utilizaron cinco gravímetros relativos Lacoste & Romberg, modelo G, con una precisión de 0.05 mgal. De esta manera se conforma la Red Gravimétrica Nacional en todo el país.

Los datos de gravedad de las estaciones absolutas y relativas se entregan al proyecto de la IAG (International Association of Geodesy) – Gravity Field Com-

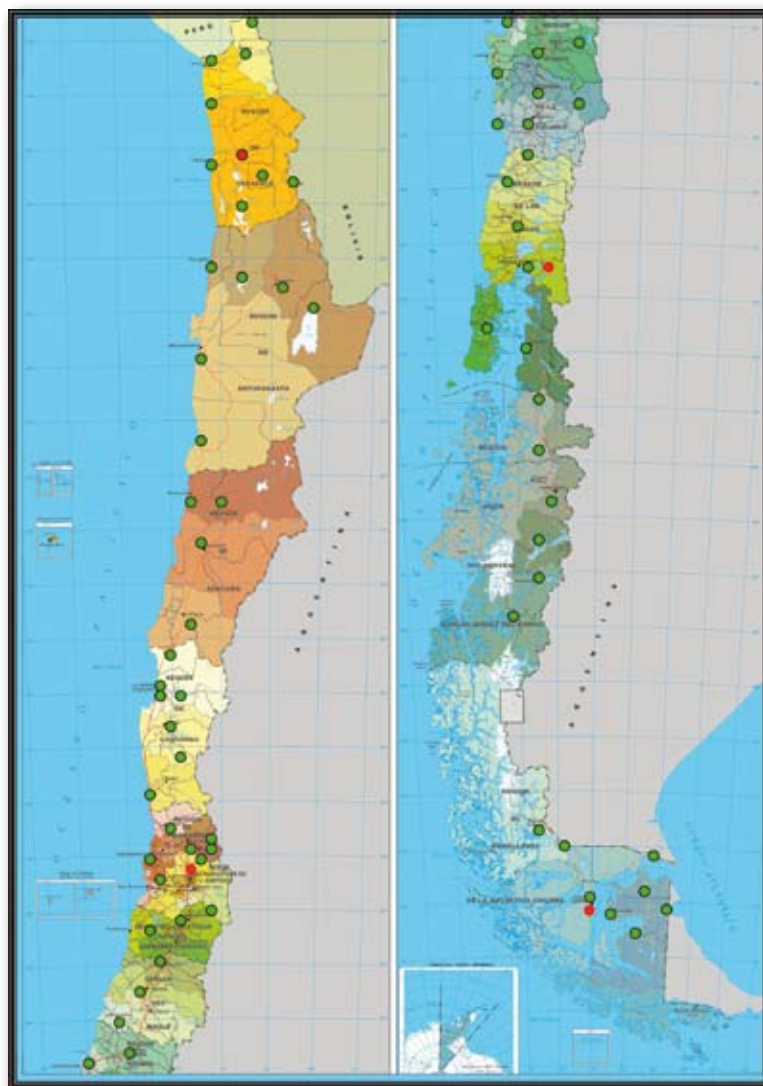


Figura 10. Estaciones de gravedad relativa.

mission – Gravity in South America, el que tiene como misión mejorar el geoides sudamericano. Página web www.iag-aig.org/

Por otro lado, los datos de la densificación de gravedad se envían al IGB (International Gravity Bureau), y a la NASA (National Aeronautics and Space Administration), actualmente la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency), con el objeto de mejorar el modelo geoidal mundial EGM96 (Earth Gravity Model 1996). Página web <http://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html/>

Actualmente el IGM está realizando el proyecto de Cartas Gravimétricas (Figura 11) el que consiste en hacer una cartografía temática a escala 1:500.000 que representa las anomalías de gravedad mediante escalas de colores, valiéndose de la base cartográfica del mapa de Chile 1:500.000. Estas cartas permiten visualizar el comportamiento de la gravedad de las zonas determinadas.

El proyecto se ha venido desarrollando en cuatro cartas de dicha escala, las que se encuentran en su etapa de elaboración final. Estas son: Illapel, Santiago, Rancagua-Talca y Concepción.

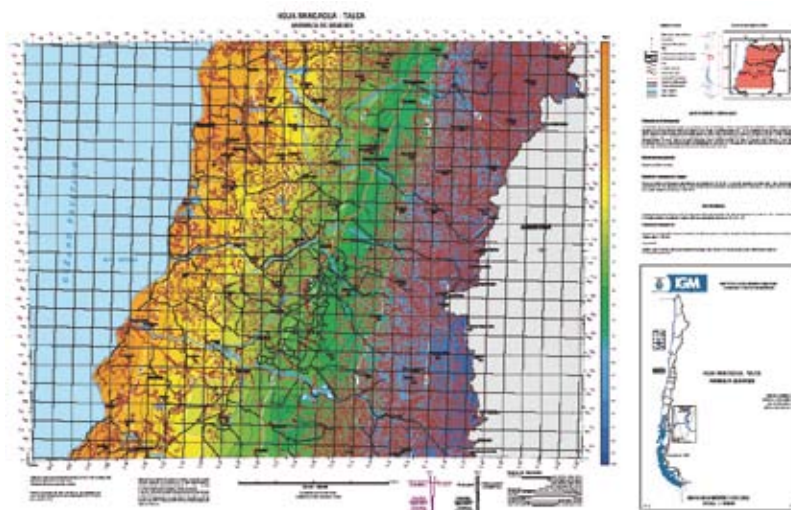


Figura 11. Carta gravimétrica.

7. Conceptos y Antecedentes Técnicos

7.1 Conversión entre coordenadas geodésicas (geográficas) y cartesianas (X, Y, Z)

La conversión entre coordenadas geodésicas (geográficas), latitud, longitud y altura geodésica (Figura 12) y coordenadas cartesianas tridimensionales (X, Y, Z) (Figura 13), se realizan con las siguientes fórmulas (Figura 14). Es esencial que se empleen los parámetros correspondientes al elipsoide GRS-80.

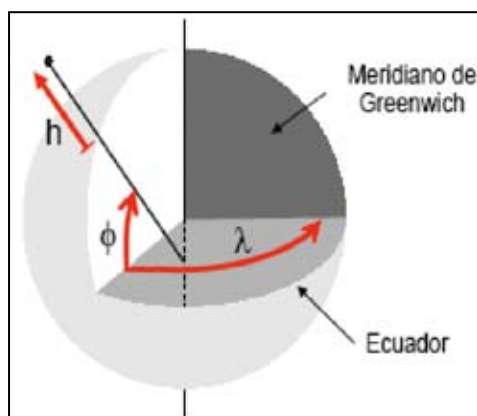


Figura 12. Coordenadas geodésicas.

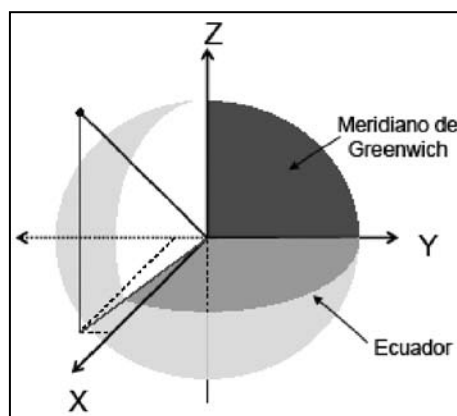


Figura 13. Coordenadas cartesianas.

Geodésicas a Cartesianas

$$X = \left(\frac{a}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \phi)^{1/2}} + h \right) \cos \phi \cos \lambda$$

$$Y = \left(\frac{a}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \phi)^{1/2}} + h \right) \cos \phi \operatorname{sen} \lambda$$

$$Z = \left(\frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \phi)^{1/2}} + h \right) \operatorname{sen} \phi$$

$$e^2 = 2f - f^2$$

$$h = N + H$$

Donde:

a : semieje mayor del elipsoide

b : semieje menor del elipsoide

f : achatamiento del elipsoide

e^2 : excentricidad

N : ondulación geoidal

h : altura elipsoidal

H : altura ortométrica

Cartesianas a Geodésicas
$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right)$ $\phi = \tan^{-1} (Z + e^2 [\text{asen}^3 u]) / (1 - f)$ $h = \rho \cos \phi + Z \text{sen} \phi - a (1 - e^2 [\text{sen}^2 \phi])^{1/2}$ <p>Donde:</p> $\rho = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ $u = \tan^{-1} \frac{Z (1 - f)}{\rho} \left[1 + \frac{e^2 a}{r (1 - f)} \right]$ $r = (p^2 + Z^2)^{1/2}$

Figura 14. Fórmulas de transformación de coordenadas
 (es esencial que se empleen los parámetros correspondientes al elipsoide GRS-80).

7.2 Características de los Sistemas de Referencia Clásicos y Geocéntricos

- Los sistemas de referencia clásicos se caracterizan por:
 - Alcance local o regional.
 - Realizados en base a técnicas de medición terrestre.
 - Vinculación al campo de gravedad.
 - Redes horizontales y verticales, separadas e independientes.
 - Punto Datum como origen.

- Los sistemas de referencia geocéntricos se caracterizan por:
 - Alcance global.
 - Realizados en base a técnicas geodésicas espaciales.
 - Ser tridimensionales.
 - Centro masa de la tierra como origen (ITRS)

7.3 Marcos de Referencia Geodésicos para el Posicionamiento Satelital

Las redes de densificación a distintas escalas (Figura 15), se pueden definir como:

- Red Global: Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) y WGS-84
- Red Continental: SIRGAS 2000
- Red Nacional: RGN SIRGAS - CHILE
- Red Regional: VIII REGIONAL
- Red Local: Levantamientos locales

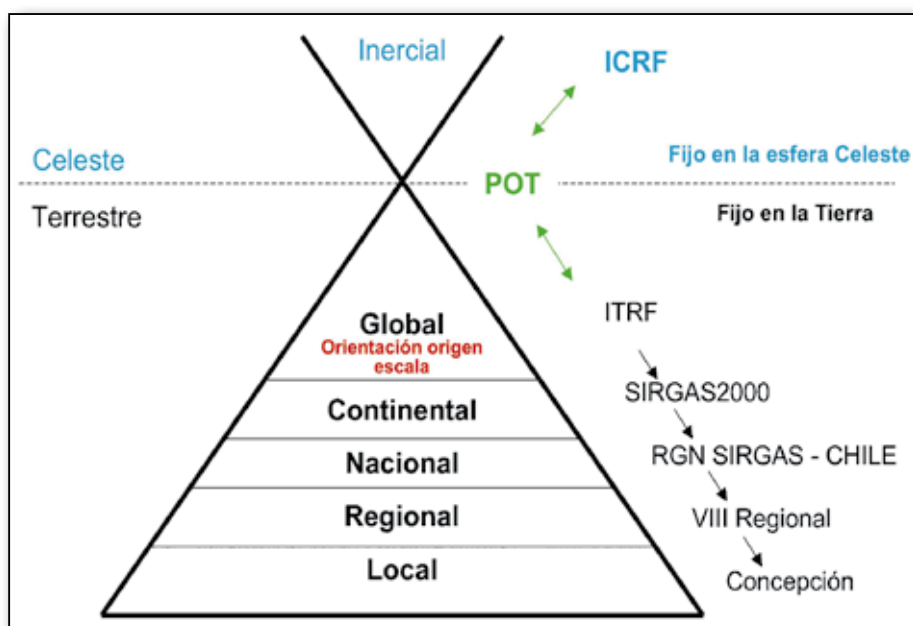


Figura 15. Sistema de referencia geodésicos.

7.4 Marco de Referencia Terrestre Internacional - ITRF

- Establecido por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre (IERS) en el año 1988.

- Cuenta con una red conformada por más de 200 estaciones alrededor del mundo, definidas con una precisión absoluta de $\pm 1/3$ cm.
- Para la implementación del Marco ITRF se utilizan las siguientes técnicas de posicionamiento: VLBI, SLR, LLR, GPS y DORIS.
- Considera la variable tiempo como una cuarta dimensión.
- La estabilidad centimétrica puede mantenerse sólo si referimos las coordenadas a una época en particular, Ej.: coordenadas + velocidad (mm/año).
- Esto se logra teniendo en cuenta los efectos producidos por el movimiento de las placas tectónicas.

7.5 Servicio GPS Internacional (IGS)

- Sistema operativo desde el 1 de enero de 1994.
- Suministra apoyo a actividades geodésicas y geofísicas a través de una red de estaciones que capturan sistemáticamente datos de observación GPS.
- Productos generados por el IGS accesibles vía internet:
 - Efemérides precisas.
 - Parámetros de rotación terrestre.
 - Coordenadas y velocidades de las estaciones de rastreo.
 - Información ionosférica y troposférica.
- Aplicación importante: permite el acceso global y contribuye a mejorar el marco de referencia ITRF.

“La vigencia de cualquier sistema de referencia está marcada por su utilización, como Instituto Geográfico Militar los invitamos a promover la adopción y utilización de este nuevo marco de referencia nacional SIRGAS”.

8. CAMPAÑA GEODÉSICA CONJUNTA IGM - USUARIOS

La realización de esta campaña tuvo como objetivo la densificación de la Red Geodésica Nacional, en lugares de interés para los diferentes usuarios. Siendo invitados a participar de la campaña de medición en noviembre del 2004, comprometiendo a los participantes a ejecutar las mediciones de acuerdo con los requisitos dispuestos en la ocasión, como por ejemplo; tiempo de medición 48 horas, hora de inicio 00:00 hrs. UTC, receptores geodésicos (GPS) de doble frecuencia, medición de alturas instrumentales, entre otros. En esta oportunidad participaron 22 empresas e instituciones aportando 54 nuevos puntos para la Red SIRGAS.



CODELCO DIV. NORTE.



CODELCO DIV. ANDINA.



INGENDESA.



ISLA DE PASCUA.



SOQUIMICH S.A.



MINERA ZALDÍVAR.

9. ESTACIONES ACTIVAS FIJAS

La ubicación de estas estaciones como se mencionó anteriormente están situadas en instalaciones militares e instituciones educacionales. A continuación algunas de ellas.



LA CAMPANA.



ANTUCO.



LONQUIMAY.



MEHUÍN.



COIHAIQUE.



TORTEL.



SANTIAGO.



RANCAGUA.



Red Geodésica Nacional SIRGAS - Chile

SNIT

El Sistema Nacional de Coordinación de la Información Territorial (SNIT), reconoce en su Plan Nacional de Captura y Estandarización de la Información Territorial 2003 – 2005, como sus dos pilares tecnológicos fundamentales:

- La georreferenciación del dato territorial
- Su manejo en red y en línea

En este contexto el trabajo desarrollado por el Instituto Geográfico Militar, de dotar al país con un sistema único y uniforme para referir cualquier dato y/o actividad que se realice sobre el territorio nacional, adquiere una relevancia fundamental, dado que se enmarca dentro de los objetivos del SNIT y refuerza el principio de compartir e intercambiar información, de manera de evitar la duplicidad de recursos y esfuerzos.

La georreferenciación del dato territorial hacia un Sistema de Referencia Único, constituye entonces una obligación tanto para los generadores como usuarios de la información territorial, dado que permite la interoperabilidad y complementación de la información, con el consecuente ahorro de recursos económicos y humanos.

El SNIT considera en su estructura el Área de Información Territorial Básica, que concentra a los generadores de la Información Territorial, que dentro de sus actividades ha considerado la recomendación de un Sistema de Referencia Único para el país.

En los “Estados de Avances 2003 – 2004 y 2005 del Plan Nacional de Captura de la Información Territorial”, el SNIT reconoce el trabajo realizado por el IGM

y el Grupo de Información Territorial Básica, en esta materia y respalda y recomienda el empleo del Sistema SIRGAS.

El SNIT respalda y recomienda el empleo de SIRGAS, en la actualidad su Secretaría Ejecutiva estudia una propuesta legal que oficialice este Sistema de Referencia, en todos los sectores del quehacer nacional.

TIGO

Observatorio Geodésico Integrado Transportable

El Observatorio Geodésico Integrado Transportable (TIGO) es un observatorio geodésico que forma parte de una infraestructura global que realiza y mantiene en el largo plazo, a través de sus observaciones, los sistemas de referencia terrestre y celeste, que son los sistemas de referencia primarios. La operación de este observatorio está en función de los requerimientos de diversos servicios internacionales.

El TIGO es el resultado de un acuerdo de colaboración entre la Oficina Federal de Cartografía y Geodesia de Alemania, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) y un consorcio chileno compuesto por las Universidades de Concepción, del Bío Bío y el IGM. Éste opera exitosamente desde el año 2002, al interior de la Universidad de Concepción. Corresponde a una de las 8 estaciones fundamentales de geodesia que existen en el mundo, siendo TIGO la única estación en América Latina. Foto 2.

TIGO es un punto de referencia en el tiempo, en el espacio y en el campo gravitacional, del más alto nivel que técnicamente hoy es posible. El monitoreo preciso y permanente contribuye a la geociencia con datos para conocer la variabilidad de la rotación de la tierra, movimientos de la corteza, movimientos de centro de masa de la tierra, mareas terrestres, nivel del mar y atmósfera.



Foto 2: Observatorio Geodésico Integrado Transportable, TIGO.

Las estaciones fundamentales marcan un punto de referencia de alta precisión, tanto en el sistema de referencia global como en el nacional. TIGO es por su concepción y equipamiento una estación fundamental de geodesia creada para cumplir esta tarea.

El IGM inició en septiembre de 1999 las gestiones –mediante el envío de una Carta Intención– con la Oficina Federal de Cartografía y Geodesia (BKG), para recibir a TIGO con el objetivo de tener acceso a tecnología del más alto nivel de desarrollo geodésico en nuestro país.

TIGO ha desempeñado un rol importante en la definición de la nueva red de referencia geodésica en Chile, combinándola con un Marco de Referencia Terrestre (ITRF). Por medio de GPS, la posición de TIGO será utilizada como un punto principal de referencia de la Tierra. Como el observatorio operará en Chile por un largo período, proporcionará, además, información precisa sobre la velocidad del movimiento continental. Este dato es importante para mejorar el conocimiento del interior de la Tierra y que es fundamental para la investigación geodinámica.

La misión del observatorio TIGO consiste en contribuir conjuntamente a la realización y actualización de los sistemas de referencia geodésicos globales (Marco de Referencia Celeste (ICRF), Marco de Referencia Terrestre (ITRF), los que constituyen hoy en día la base para la determinación de la posición por medio de sistemas de navegación asistida por satélites.

Sistemas de Medición en TIGO

1. VLBI en TIGO

TIGO opera un radiotelescopio de 6 m con un amplificador refrigerado a -252°C en la banda S (2.2-2.4 GHz) y en la banda X (8.0-9.0 GHz). La adquisición de datos es realizada con el sistema de grabación VLBA4 o con el sistema S2. Como frecuencia normal están disponibles dos máser de hidrógeno (Varianza Allan 10-15). En Concepción TIGO realiza aproximadamente 120 series de observaciones anuales, cada una con 24 horas de duración. Usualmente las observaciones son requeridas por el Centro de Coordinación del Servicio de VLBI Internacional (IVS). Foto 3.



Foto 3: Antena para VLBI emplazada en TIGO.

2. SLR en TIGO

TIGO opera un telescopio de \varnothing 50 cm para las mediciones SLR con dos longitudes de onda: infrarrojo cercano $\lambda_1 = 847$ nm y violeta $\lambda_2 = 423.5$ nm. La medición de dos colores permite una corrección de la dispersión de la luz en la atmósfera (Foto 4). El Pico-Event-Timer (PET) de TIGO define la precisión instrumental con un error de 2 ps, lo que corresponde a un error de viaje de la velocidad de la luz de solamente 0.6 mm.

El Sistema de Mediciones Láser de TIGO (TLRS) es operado por el Servicio Internacional de Mediciones Láser, el que coordina las actividades en el mundo para la realización del sistema de referencia terrestre global, así como también la predicción y determinación de las órbitas de los satélites, calibración de altímetros y determinaciones del geoide.



Foto 4: Telescopio láser de 50 cm de diámetro.

3. GNSS en TIGO

TIGO opera dos receptores híbridos Navstar/Glonass como estación permanente. El monumento construido especialmente contiene un inclinómetro para la observación de su estabilidad en períodos largos. El monumento también permite realizar mediciones locales de amarre sin remover la antena Navstar/Glonass.

Los datos Navstar/Glonass están disponibles a través del Servicio Internacional de GPS (IGS) y sirven principalmente para la realización del sistema de referencia terrestre global.

Adicionalmente, TIGO posee cuatro receptores Ashtec Z12 (Foto 5), los que son usados en una red GPS regional para la determinación de la estabilidad de la Región del Biobío.



Foto 5: Equipo GPS.

En síntesis:

TIGO es una Estación Fundamental de Geodesia diseñada para densificar la actual configuración de estaciones fundamentales existentes en el planeta, y en ese rol se ha constituido como la primera estación fundamental en Sudamérica.

TIGO cumple una tarea internacional, ya que con sus mediciones contribuye a la realización de los sistemas de referencia globales, fundamentales para la precisión de los sistemas de referencia tales como SIRGAS.

Los instrumentos de TIGO permitirán tener una marca de muy alta precisión para efectuar investigaciones geodésicas y geofísicas en la región, posibilitando la participación de Chile en proyectos de geodesia global, expandiendo el conocimiento existente en esta área de estudios.

Monitorea desde Concepción-Chile con sus instrumentos los cambios globales que afectan a nuestro planeta, manteniendo un importante inventario de datos que a futuro tendrán una gran valoración.

Glosario de Términos Geodésicos

acimut: Ángulo medido en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte, con un valor comprendido entre 0 y 360°. Se denomina rumbo si se mide con respecto al norte magnético, mientras que se emplea el término acimut geográfico si se mide con respecto al norte geográfico.

actualización cartográfica: Proceso de revisión y modificación de la información gráfica y temática, con el fin de que la cartografía recoja los cambios habidos en el tiempo en el territorio que representa.

almanaque: Información aproximada de los parámetros orbitales de los satélites de la constelación NAVSTAR. Datos, transmitidos por un satélite GPS, que incluyen información de la órbita de todos los satélites, correcciones horarias, y parámetros de retraso atmosférico. El almanaque facilita la adquisición rápida de SV. La información de órbita es un subconjunto de los datos de efemérides con precisión reducida.

altitud: Distancia medida verticalmente desde un punto a la superficie de nivel de referencia que constituye el origen de las altitudes de los mapas topográficos de un país.

altitud normal: Es la longitud medida sobre la normal al elipsoide desde este a un punto sobre la superficie terrestre.

altitud ortométrica: Altitud de un punto de la superficie terrestre sobre el geoid, medida a lo largo de la línea de plomada. Debido a la falta de paralelismo entre las superficies de nivel o superficies equipotenciales en el campo de la gravedad, la altitud ortométrica es distinta para puntos de una misma superficie de nivel.

CAP (Central Andes Project): Proyecto de los Andes Centrales, que tiene como objetivo el monitoreo del área de subducción de la placa de Nazca, en el margen continental oeste, para observar la deformación asociada a eventos sísmicos (KENDRICK, et al., 1999). En este proyecto el IGM trabaja en conjunto con la Universidad del Estado de Ohio, EE.UU.

coordenadas cartesianas ortogonales: Coordenadas definidas en base a una terna ordenada de ejes ortogonales.

altura geodésica o elipsoidal (h): La distancia, medida a lo largo de la perpendicular, desde la superficie del elipsoide a un punto.

cuadrícula: Sistema de referencia basado en una malla cuadrada. Es un sistema de coordenadas rectangular, horizontal y bidimensional, que se utiliza reglamentariamente en la cartografía oficial de un país.

datum: Punto fundamental del terreno, determinado por observación astronómica, con el que se enlazan los extremos de la base del primer triángulo de una cadena de triangulación y que sirve de origen a todas las coordenadas geográficas de la red.

datum geodésico: Conjunto de parámetros que determinan la forma y dimensiones del elipsoide de referencia.

efemérides: Conjunto de parámetros que describen las órbitas de los satélites, recalculados, con sus variaciones, sobre las órbitas predeterminadas y programadas en los sistemas de navegación de los satélites. Todos los satélites GPS transmiten periódicamente una efeméride de emisión que contiene las posiciones previsibles en el futuro próximo, cargadas por el segmento de control.

EGM96: Modelo gravimétrico terrestre mundial del año 1996.

elipsoide de referencia: Superficie formada por la revolución de una elipse alrededor de su eje menor y usado como dato de comparación en levantamientos geodésicos del globo terrestre. Es la figura matemática que más se aproxima al geode, siendo sencilla de definir matemáticamente.

error relativo en la posición: Es la relación entre el error y la magnitud relacionada con el mismo. Usualmente se expresa como $1/x$ o en partes por millón.

exactitud: Grado de aproximación de una magnitud a un valor libre de errores sistemáticos.

geodesia: Ciencia que tiene por objeto el estudio y la determinación de la forma, dimensiones y campo de la gravedad de la Tierra y de los cuerpos celestes cercanos a ella. Previamente a la realización del mapa topográfico de un país son necesarios los trabajos de geodesia. Permite obtener datos para fijar con exactitud los puntos de control de la triangulación y la nivelación.

geodesia física: Es la rama de la geodesia superior en la que se considera la teoría física del estudio de la figura de la Tierra y de su campo gravitacional. Como objetivo tiene la determinación de los parámetros del elipsoide terrestre, el estudio de las desviaciones con respecto de su superficie y los cálculos del potencial de la fuerza de gravedad terrestre.

geode: Es la superficie de nivel, equipotencial en el campo de la gravedad, que adopta la forma de esferoide irregular tridimensional. Debido a que depende de la distribución de masas en el interior de la Tierra, es imposible representarlo matemáticamente. Para ello se utiliza el elipsoide de referencia que más se le

aproxime o ajuste. Es coincidente con la superficie del agua en reposo de los océanos, extendida virtualmente por debajo de los continentes, de manera que la dirección de las líneas de plomada crucen perpendicularmente esta superficie en todos sus puntos.

GNSS: Los Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS) permiten el posicionamiento en cualquier parte del mundo contando con sistemas receptores apropiados, los que procesan las señales de microondas de los sistemas de satélites. Los sistemas de Posicionamiento Global (GPS) en operación son: Navstar Norteamericano, Glonass ruso y Galileo europeo, el que será puesto en operación en un futuro cercano.

GPS: Sistema de posicionamiento con satélites (Global Positioning System) que desde sus orígenes en 1973 ha supuesto una revolución frente a las técnicas utilizadas en geodesia clásica. La precisión métrica en un principio era la necesaria para la navegación en tiempo real, pero pronto se puso de manifiesto la posibilidad de sus aplicaciones en geodesia, al permitir conocer la posición del observador con precisiones similares a las de los métodos clásicos, mediante el posprocesado de datos, siendo en la actualidad un instrumento capaz de satisfacer demandas dentro de los campos de la geodinámica y la geofísica. La idea básica del sistema es la medida de distancias entre el aparato receptor y al menos cuatro satélites de la constelación NAVSTAR, de manera que la primera operación es conocer la posición del satélite en una época determinada por medio de los parámetros orbitales radiodifundidos en el mensaje de navegación. De esta manera, y mediante el tratamiento de los observables GPS (medidas de fase, tiempo y pseudodistancias) se puede conocer la posición en posprocesado de la antena del receptor, cuyas coordenadas vendrán dadas en el sistema de referencia WGS 84, por lo que habrá que realizar una transformación de este sistema al conjunto de referencia local que se precise.

GPS diferencial: El GPS Diferencial (DGPS) se utiliza para solventar los errores que se producen trabajando con un receptor GPS autónomo. Partiendo del principio de que los errores son muy similares en receptores GPS no muy lejanos entre sí, se pueden calcular las correcciones en una estación base y emitirlas para que un receptor móvil pueda aplicarlas a su posición, incrementando así su exactitud al posicionarse. Esta técnica ha desarrollado diversos métodos de transmitir correcciones diferenciales desde una estación de referencia fija a un receptor móvil.

IAG: Asociación Internacional de Geodesia.

ICRS: Sistema de Referencia Celeste.

IERS: Servicio Internacional de Rotación de la Tierra.

IGS: Servicio Internacional Geodinámico GPS.

ITRF: Marco de referencia global obtenido por el IERS a partir de una solución combinada que incluye observaciones captadas por diversas técnicas espaciales: DORIS, GPS, SLR y VLBI.

latitud: Ángulo medido sobre un arco de meridiano, que hay entre un punto de la superficie terrestre y el Ecuador.

longitud: Distancia angular, medida sobre un arco de paralelo, que hay entre un punto de la superficie terrestre y un meridiano tomado como base u origen.

marco de referencia: constituye la materialización del sistema de referencia sobre la superficie terrestre. Para fines prácticos un sistema de referencia se materializa mediante un conjunto de pilares geodésicos implantados en un área, a los que se le han determinado coordenadas geográficas, planas y altura.

meridiano: Círculo máximo de la Tierra o de la esfera celeste que pasa por los polos. Queda definido por la intersección del plano del meridiano con la esfera. Todos los puntos que pertenezcan al mismo meridiano vienen caracterizados por tener la misma hora local.

modelo digital del terreno: Es la representación cuantitativa en formato digital de la superficie terrestre. Contiene información acerca de la posición (x, y) y la altitud (z) de los elementos de la superficie. La denominación MDT es la genérica para todos los modelos digitales, incluyendo los DEM, en los cuales la coordenada z se refiere siempre a la elevación sobre el terreno, y a los demás tipos de modelos en los que la z puede ser cualquier variable (profundidad de suelo, número de habitantes, etc.)

NAVSTAR, constelación: Constelación de satélites de navegación, cronometría y distanciometría, formada por un total de veinticuatro satélites operativos y otros tres de reserva, que se caracteriza por la altitud media de las órbitas de 20.200 km, plano orbital con una inclinación de 55° y un período orbital de 12 horas sidéreas.

nivelación geométrica: Consiste en determinar la diferencia de altitud entre los puntos observados, realizando visuales horizontales dirigidas a miras verticales.

nivelación trigonométrica: Método altimétrico para determinar el desnivel de un punto respecto de otro, midiendo la distancia cenital o el ángulo de pendiente de la visual, junto con la distancia entre ambos puntos.

norte geográfico: Es el señalado por la meridiana geográfica.

norte magnético: Es el indicado por el polo norte magnético. Los polos magnéticos no son extremos de un diámetro terrestre y cambian constantemente de posición según una serie de leyes físicas.

Ondulación del geoide/separación geoide-elipsoide (N): La elevación o depresión del geoide respecto de un elipsoide de referencia.

ortofoto: Imagen fotográfica del terreno, con el mismo valor cartográfico que un plano, que ha sido sometida a un proceso de rectificación diferencial que permite realizar la puesta en escala y nivelación de las unidades geométricas que lo componen.

ortoproyección: Método riguroso de obtención de fotomapas. Corrige el error debido a la inclinación del eje de toma y relieve del terreno en pequeñas unidades geométricas de la fotografía original, de manera que las fotografías perfectamente ensambladas dan como resultado una imagen fotográfica métrica del terreno.

parámetros de transformación: Conjunto de cantidades que permiten convertir coordenadas dadas de un sistema a otro; se utilizan básicamente tres traslaciones, a las que pueden agregarse tres rotaciones y un factor de escala.

proyección universal transversal de Mercator: Proyección cilíndrica conforme en la que el cilindro es tangente al elipsoide a lo largo de un meridiano tomado como origen, y el eje del cilindro está sobre el Ecuador. Esta proyección divide a la Tierra en 60 husos de 6° sexagesimales de longitud cada uno, numerados a partir del antemeridiano de Greenwich (meridiano 180°).

puntos de apoyo: Puntos en el terreno levantados por topografía que sirven de base para la orientación absoluta en la restitución fotogramétrica, y para efectuar un tratamiento geométrico o georreferenciación de los datos en teledetección.

red geodésica: Conjunto de puntos denominados vértices, materializados físicamente sobre el terreno, entre los cuales se han realizado observaciones geo-

désicas con el fin de determinar su precisión tanto en términos absolutos como relativos. Una red geodésica es la estructura que sostiene a toda la cartografía de un territorio.

RINEX: Receiver Independent Exchange (Formato independiente para el intercambio entre receptores). Un formato estándar de archivo de datos brutos GPS que se utiliza para intercambiar archivos entre varios fabricantes de receptores.

SAGA: (South American Geodynamic Activities). Proyecto que tiene como objetivos principales el monitoreo del área de subducción de la placa de Nazca en relación a la placa Sudamericana y las deformaciones producidas en ésta, además de medir el desplazamiento producido por la subducción. En el desarrollo de éste el IGM está asociado al Geoforschung Zentrum Potsdam (GFZ) de Alemania.

SIRGAS 1995: Marco de Referencia del año 1995.

SIRGAS 2000: Marco de Referencia del año 2000.

Sistema de Información Geográfica: Es el conjunto formado por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación.

Sistema de Referencia: La geodesia necesita definir además de un sistema de coordenadas, un conjunto de constantes y parámetros homogéneos, algunos fundamentales y otros derivados. Ellos incluyen una unidad métrica, actualmente definida por la velocidad de la luz en el vacío, una escala de tiempo, el producto de la constante de atracción universal por la masa de la tierra, GM ,

incluyendo o no la masa de la atmósfera, un elipsoide de referencia dado por dos constantes geométricas, semieje mayor y excentricidad, una velocidad de rotación de la Tierra, un conjunto de coeficientes de desarrollo en armónicas esféricas del potencial terrestre, una fórmula de gravedad normal, las constantes de presesión y nutación que permiten pasar de un sistema fijo con respecto a la Tierra a un sistema inercial.

SLR: Mediciones Láser a Satélites (SLR) es un método de medición de distancias realizado mediante la emisión de pulsos láser a satélites de acuerdo con el principio de pulso-eco. Los objetivos son retroreflectores de satélites pasivos o activos, que se encuentran en órbitas de 300 km a 40.000 km de distancia de la superficie de la Tierra. Los satélites son seguidos por el telescopio láser y miden los intervalos de tiempo de viaje de los pulsos láser emitidos. Las mediciones láser permiten la determinación de las órbitas de los satélites y también la localización del telescopio láser dentro de pocos milímetros. Los satélites están orbitando el centro de masa de la Tierra dentro de su campo gravitacional, lo que puede ser derivado de las mediciones láser.

triangulación: Conjunto de operaciones que tienen por objeto fijar sobre la superficie sobre la cual se quiere cartografiar la posición de los puntos claves que forman una red de coordenadas geográficas en un mapa.

vértice geodésico: Materialización sobre el terreno, por medio de marcas o construcciones efectuadas, de puntos entre los que se han realizado mediciones geodésicas y cuyas coordenadas y precisión se conocen mediante el procesamiento de las observaciones.

VLBI: Interferometría de Línea Base muy Larga (VLBI) es un método de medición interferométrico, que es usado tanto en geodesia como en radioastronomía. Radiotelescopios separados espacialmente observan simultáneamente

quásares localizados en los bordes del universo (distantes 3-13 billones de años luz). Después de las observaciones el proceso interferométrico se realiza en un computador con los datos de todas las observaciones simultáneas de los observatorios, en uno de los centros de correlación.

WAAS: Sistema de aumentación de área extensa americano. Es un sistema DGPS (GPS Diferencial) que no utiliza los datos de una única estación de referencia, sino que se usa la información procesada de varias estaciones a la vez, y no se requiere un equipamiento adicional.

WGS-84: Designa el Sistema Coordinado materializado y diseminado por la agencia norteamericana National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), ex NIMA. El origen de este Sistema de Referencia se remonta a la era Doppler, aunque en la actualidad está basado prácticamente en observaciones GPS. La solución más reciente es el denominado WGS84 versión G873, época 1997.0, donde la letra G denota que la solución sólo contiene observaciones GPS. El número 873 hace referencia a la semana GPS en que las efemérides precisas calculadas por NIMA se distribuyeron por vez primera al público en este nuevo sistema coordinado (0h UTC, septiembre 29, 1996). Las efemérides incluidas en el mensaje radiado por los satélites GPS se expresan también en este marco de referencia desde el 29 de enero de 1997. Hasta entonces se había utilizado el sistema WGS84 (G730) definido de forma similar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Relatorio de SIRGAS del año 1997, Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE).
2. Recomendaciones Técnicas del Grupo de Trabajo I, II y III de SIRGAS.
3. Boletines informativos de SIRGAS.
4. Anuarios del Instituto Geográfico Militar de Chile (1980).
5. Especificaciones Topográficas del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (Comisión de Cartografía, 1979).
6. Estudio de Actualización de la Red Geodésica Nacional, Ingenieros Geomensoros Lautaro Díaz S. y Wilfredo Rubio D. Universidad de Concepción (2000).
7. Geodesia Geométrica, Física y por Satélites, Rafael Cid P. y Sebastián Ferrer M., Universidad de Zaragoza, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España, 1997.
8. Geodesia Física, Weikko Heiskanen y Helmut Moritz, Instituto de Astronomía y Geodesía, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España, 1985.

PÁGINAS WEB

1. www.igm.cl
2. www.sirgas.org
3. www.iers.org/
4. www.dgfi.badw.de
5. www.iag-aig.org/
6. www.ipgh.org/
7. www.nga.mil/
8. www.bernese.unibe.ch
9. www.unavco.org/
10. www.iugg.org/
11. www.gfz-potsdam.de/pb1/pg1/neh/index_saga.html
12. www.tigo.cl
13. <http://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html/>
14. <http://igsjb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>

Estas páginas web fueron visitadas en diciembre de 2007.

